

THESIS / THÈSE

MASTER EN SCIENCES BIOLOGIQUES DES ORGANISMES ET ÉCOLOGIE

L'étang de Virelles

étude de la qualité des eaux, des macrophytes et du phytoplancton

Buisset, Aurélie

Award date:
2005

Awarding institution:
Université de Namur

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



**FACULTES UNIVERSITAIRES NOTRE-DAME DE LA PAIX
NAMUR**

Faculté des Sciences

L'ETANG DE VIRELLES

**ETUDE DE LA QUALITE DES EAUX, DES MACROPHYTES ET DU
PHYTOPLANKTON**

**Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
licencié en Sciences biologiques**

Auréliе BUISSET
Août 2005

L'étang de Virelles
Etude de la qualité des eaux, des macrophytes et du phytoplancton

BUISET Aurélie

Résumé

Dans ce travail, j'ai abordé, de manière globale, l'étude de l'écosystème aquatique de l'étang de Virelles. Pour y arriver, j'ai réuni des données sur les macrophytes aquatiques et rivulaires, la qualité physico-chimique des 11 affluents et de l'étang ainsi que sur la biomasse algale.

J'ai également intégré des données sur les communautés phytoplanctoniques et sur la faune présente (oiseaux, poissons,...). Une importante littérature sur le lac a été consultée.

La liste des macrophytes aquatiques et autres espèces rivulaires a été actualisée au moyen de relevés de la végétation. Soixante-sept espèces des milieux humides ont été identifiées, plusieurs font l'objet d'un statut de protection particulier (*Hydrocharis morus-ranae*,...). De plus, une évolution originale dans les communautés aquatiques a été mise en évidence: le groupement à *Potamogeton pusillus* observé début juin est progressivement remplacé par un groupement de *Potamogeton pectinatus*.

Sur le plan physico-chimique, les concentrations varient fortement durant les saisons mais aussi en fonction des vidanges de l'étang. L'année qui suit la vidange, l'eau est de bonne qualité (9 juin 2004: 0,141mg NH_4^+ /l; 0,031mg PO_4^{3-} /l; 4,186 mg NO_3^- /l). Le plan d'eau peut être classé comme mésotrophe. Par contre, avec le temps, la qualité se dégrade et le site est classé comme eutrophe à hypereutrophe (le 20 juin 2005: 1,937 mg NH_4^+ /l; 0,718 mg PO_4^{3-} /l; 0,525 mg NO_3^- /l). Le phosphore total et les orthophosphates sont les principaux éléments en excès.

Les modifications au sein des communautés algales montrent une évolution allant des espèces sensibles à la qualité de l'eau vers des espèces tolérant une dégradation de celle-ci ainsi qu'une réduction de la luminosité. Ceci risque d'entraîner la formation de fleurs d'eau ayant des conséquences néfastes sur l'écosystème (anoxie, réduction de la transparence de l'eau,...).

Les analyses multivariées des relevés de la végétation conduisent notamment à définir plusieurs groupements de végétaux (*Lythrum salicaria*, *Phalaris arundinacea*, *Carex vesicaria*, *Phragmites australis* et *Potamogeton spp*).

Tous ces résultats conduisent à proposer diverses actions visant à restaurer cet écosystème fortement eutrophisé et donc menacé.

Mémoire de licence en Sciences Biologiques
Août 2005

Promoteur: J.-C. Micha

Tuteur: G. Bouxin

The lake of Virelles
Study of water quality, macrophytes and phytoplankton

BUISSET Aurélie

Summary

In this work, I have study the aquatic ecosystem of the lake of Virelles. I have collect data about aquatics macrophytes, quality of water from the affluents and the lake as about the biomass of algae.

I have also integrated data about phytoplanktonics communities and about the present fauna (Birds, fishes,...). A considerable literature on the lake was consulted.

The list of aquatics macrophytes and other species from the shore was updated by means of vegetation statements. I have identified sixty-seven species from humid environments, several are protected (*Hydrocharis morus-ranae*,...). Further, the evolution of aquatics communities was emphasized: the group of *Potamogeton pectinatus* gradually replaces the group of *Potamogeton pusillus* observed at the beginning of June.

With regard to the physical chemistry, the concentrations change a lot during seasons but also according to the emptying of the lake. The year after the emptying, the water has a good quality (09/06/2004: 0,141mg NH_4^+ /l; 0,031mg PO_4^{3-} /l; 4,186 mg NO_3^- /l). The lake is classified like mesotroph. However, with the time, the quality is deteriorating and the site is classified like eutroph to hypereutroph (20/06/2005: 1,937 mg NH_4^+ /l; 0,718 mg PO_4^{3-} /l; 0,525 mg NO_3^- /l). Total phosphorus and soluble reactive phosphor are the main elements in excess.

The modifications into algae communities show an evolution from sensitive species to quality water to species tolerant the degradation of water quality and the reduction of luminosity. This could lead to the formation of a bloom that has harmful consequences for the ecosystem (anoxia, reduction of the transparency of water,...).

The statistic analyses of vegetation statements define several groups of plants (*Lythrum salicaria*, *Phalaris arundinacea*, *Carex vesicaria*, *Phragmites australis* et *Potamogeton spp*).

All the results lead to propose various actions to restore this ecosystem strongly eutroph and so threatened.

Report in biological sciences
Augustes 2005

Promoter: J.-C. Micha

Tutor: G. Bouxin

Remerciements

Ce travail qui a occupé mon temps et mes pensées depuis les douze derniers mois n'aurait pu aboutir à son terme sans la contribution de plusieurs personnes que je voudrais remercier sincèrement.

Je voudrais d'abord remercier mon promoteur M. Micha et mon tuteur M. Bouxin de m'avoir permis de construire ce projet et de m'avoir aidée tout au long de mon cheminement. Leur rigueur scientifique et leur passion pour la science ont été une inspiration pour moi. Je remercie les membres de mon jury, Mme Blanchard, Melle Verniers, M. Depiereux et M. Descy pour leur participation à ce mémoire et pour leurs précieux conseils. Les membres du département ont fait partie de ma vie d'étudiante au cours de cette année et je ne pourrais passer sous silence leur contribution à ce mémoire par les nombreuses questions auxquelles ils ont toujours pu répondre avec enthousiasme. Ma gratitude s'adresse aussi à Bruno Leporcq pour sa disponibilité lors de mes séances de laboratoire ainsi qu'à Yves Mine pour son aide et ses bons conseils.

Ma reconnaissance va également à M. Pierret responsable de Secteur Conservation de la Nature, mon guide sur le terrain et dans la réserve tout au long de mon mémoire.

Je voudrais aussi remercier mes amis et ma famille pour leur aide et encouragement lorsque les choses ne fonctionnaient pas à la hauteur de mes attentes et pour avoir partagé mon enthousiasme lorsque tout allait bien. Un merci très particulier à Maxime qui a su me comprendre et trouver les mots justes pour me donner du courage lorsque j'en avais besoin.

Table des matières

Résumé.....	1
Summary.....	2
Remerciements.....	3
Table des matières.....	4
Liste des abréviations.....	6
Liste des noms des espèces présentes dans ce mémoire.....	8
Liste des tableaux et figures.....	11
Liste des annexes.....	13
Introduction.....	14
1. Le milieu d'étude.....	15
1.1. L'étang de Virelles.....	15
1.1.1. Localisation et origine de l'étang.....	15
1.1.2. Sauvetage du site.....	16
1.1.3. Plan de gestion de la réserve naturelle.....	16
1.1.3.1. Principes généraux de la gestion.....	16
1.1.3.2. Les différents milieux et leur environnement.....	18
1.1.3.2.1. La réserve intégrale.....	18
1.1.3.2.2. La réserve naturelle dirigée.....	18
1.1.3.2.3. La partie touristique.....	20
1.1.4. La Charte de l'étang et ses projets d'actions.....	20
1.1.4.1 Définition de la charte de l'étang.....	20
1.1.4.2. Les étapes successives de la réalisation de la Charte.....	21
1.1.4.3. Conclusion.....	22
1.2. Les facteurs abiotiques.....	22
1.2.1. Aperçu climatologique.....	22
1.2.2. Contexte géomorphologique.....	23
1.2.3. Contexte hydrogéologique.....	24
1.2.3.1. Le bassin du Ry Nicolas.....	25
1.2.3.2. Le bassin ouest.....	26
1.2.3.3. Le bassin est.....	27
1.2.4. Qualité physico-chimique des eaux.....	27
1.2.4.1. Le profil des nutriments.....	27
1.2.4.1.1. Résultats en relation avec le lieu de prélèvement.....	28
1.2.4.1.2. Evolution des concentrations en NO_3^- , NH_4^+ et PO_4^{3-} ..	30
1.2.4.2. Intérêt de la Charte pour l'étang de Virelles.....	32
1.3. Description du milieu naturel.....	32
1.3.1. La flore.....	32
1.3.1.1. Fonctions écologiques des macrophytes.....	32
1.3.1.2. Séquences macrophytiques bioindicatrices des eaux douces.....	33
1.3.1.3. La végétation aquatique de l'étang de Virelles.....	34
1.3.1.3.1. Evolution de la flore macrophytique entre 1989 et 2000...	34
1.3.1.3.2. Evolution du peuplement algal.....	34
1.3.2. La faune.....	37
	38

Liste des abréviations

a : are
A.C.E. : Actions Communautaires pour l'Environnement
a.s.b.l. : Association Sans But Lucratif
CA : Correspondance Analysis
C.A.R.A.H. Centre Agronomique de Recherches Appliquées de la province de Hainaut
C.C.E. : Commission des Communautés Européennes
Chla : Chlorophylle *a*
cm : centimètre
CO₂ : dioxyde de carbone
Cyanobactéries T1 : Cyanobactéries coccoïdes solitaires ou vivant en colonies (*Microcystis*)
Cyanobactéries T2 : Cyanobactéries filamenteuses (*Anabaena*)
°C : degré Celsius
EH : Equivalent-Habitant
fig. : figure
g : gramme
GPS : Global Positioning System
h : heure
ha : hectare
HPLC: High Performance Liquid Chromatography
km : kilomètre
km/h : kilomètres par heure
l/m² : litre par mètre carré
M. : Monsieur
m : mètre
m² mètre carré
Ma : million d'années
Melle: Mademoiselle
mg/l : milligramme par litre
mg N/l : milligramme d'azote par litre
mg NH₄⁺ /l : milligramme d'ion ammonium par litre
mg NO₃⁻ /l : milligramme d'ion nitrate par litre
mg P/l : milligramme de phosphore par litre
mg PO₄⁻⁻⁻/l : milligramme d'ion phosphate par litre
ml : millilitre
Mme : Madame
M.O. : matière organique
nm : nanomètre
NH₄⁺ : ion ammonium
NO₃⁻ : ion nitrate
NSCA: Non Symetrical Correspondance Analysis
PO₄⁻⁻⁻ : ion phosphate
Ptot : Phosphore total
% : pourcentage
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
11 N : onze nord
11 S : onze sud

R.N.O.B. : Réserves Naturelles et Ornithologiques de Belgique
SEQ-eau : Système d'Evaluation de la Qualité de l'eau des rivières
SRP : Soluble Reactive Phosphor
 μg : microgramme
 $\mu\text{g/l}$: microgramme par litre
W.W.F.: World Wildlife Fund
 X^2 : chi-carré

Liste des noms des espèces rencontrées dans ce mémoire

Abramis brama L.: Brème
Accipiter gentilis L.: Autour des palombes
Accipiter nisus L.: Épervier d'Europe
Achillea millefolium L.: Achillée millefeuilles
Acrocephalus scirpaceus HERMANN: Rousserolle effarvatte
Alisma plantago-aquatica L.: Plantain d'eau commun
Agrostis stolonifera L.: Agrostis stolonifère
Angelica archangelica L.: Angélique vraie
Anas sp: Canard
Ardea cinerea L.: Héron cendré
Azolla filiculoides LAM.: Azolla commune
Berula erecta COVILLE: Petite berle
Botaurus stellaris L.: Grand butor (ou Butor étoilé)
Buteo buteo L.: Buse variable
Callitriche obtusangula LE GALL: Callitriche à angles obtus
Callitriche hamulata KÜTZ. ex KOCH : Callitriche à crochets
Caltha palustris L.: Populage des marais
Calystegia sepium L.: Liseron des haies
Capreolus capreolus L.: Chevreuil
Cardamine amara L.: Cardamine amère
Carex acuta L.: Laîche aiguë
Carex acutiformis EHRH.: Laîche des marais
Carex elongata L.: Laîche allongée
Carex vesicaria L.: Laîche vésiculeuse
Ceratophyllum demersum L.: Cératophylle épineux
Chara hispida L.
Chara vulgaris L.
Daucus carota L.: Carotte sauvage
Eleocharis palustris ROEM et SCHULT : Scirpe des marais
Elodea canadensis MICHAUX: Elodée du Canada
Elodea nuttalli ST JOHN: Elodée à feuilles étroites.
Emberiza schoeniclus L.: Bruant des roseaux
Epilobium angustifolium L.: Epilobe en épi
Epilobium hirsutum L.: Epilobe hérissé
Epilobium palustre L.: Epilobe des marais
Equisetum fluviatile L.: Prêle d'eau
Esox Lucius L.: Brochet
Eupatorium cannabinum L.: Eupatoire chanvrine
Festuca filiformis POURR.: Fétuque capillaire
Festuca gigantea L.: Fétuque géante
Filipendula ulmaria MAXIM.: Reine-des-prés
Galeopsis tetrahit L.: Galeopsis tétrahit
Galium palustris L.: Gaillet des marais
Geum urbanum L.: Benoîte commune
Hippuris vulgaris L.: Pesse d'eau
Hottonia palustris L.: Hottonie des marais
Hydrocharis morsus-ranae L.: Petit nénuphar

Hydrodictyon reticulatum LAGERHEIM
Iris pseudacorus L.: iris des marais
Juncus effusus L.: Jonc épars
Juncus subnodulosus SCHRANK: Jonc à tépales obtus
Lemna minuta HUMB., BONPL. et KUNTH: Lentille d'eau minuscule
Lemna trisulca L.: Lentille à trois lobes
Littorella uniflora ASCHERS.: Littorelle
Lolium perenne L.: Ray-grass commun
Lychnis flos-cuculis L.: Lychnis fleur de coucou
Lycopus europeus L.: Lycope
Lysimachia vulgaris L.: Lysimaque commune
Lythrum salicaria L.: Salicaire
Mentha aquatica L.: Menthe aquatique
Mercuriale annua L.: Mercuriale annuelle
Molinia caerulea MOENCH: Molinie
Myosotis scorpioides L.: Myosotis des marais
Myriophyllum spicatum L.: Myriophylle en épi
Myriophyllum verticillatum L.: Myriophylle verticillé
Nardus stricta L.: Nard
Nasturtium officinal R.BROWN: Cresson des fontaines
Nuphar lutea SMITH: Nénuphar jaune
Nymphaea alba L.: Nénuphar blanc
Oenanthe aquatica POIRET: Oenanthe aquatique
Oenanthe fluviatilis COLEM. : Oenanthe des rivières
Ondrata zibethicus L.: Rat musqué
Orchis spp: Orchidées spp
Parus sp: Mésange
Pernis apivorus L.: Bondrée apivore
Phalaris arundinacea L.: Baldingère
Phragmites australis STEUD: Roseau commun
Picus sp: Pic
Plantago major L.: Plantin à larges feuilles
Polygonum amphibium L.: Renouée aquatique
Porzana porzana L.: Marouette ponctuée
Potamogeton berchtoldii FIEB.: Potamot de Berchtold
Potamogeton coloratus HORNEM.: Potamot coloré
Potamogeton crispus L.: Potamot crépu
Potamogeton densus L. : Potamot dense
Potamogeton friesii RUPR.: Potamot à feuilles mucronées
Potamogeton lucens L.: Potamot luisant
Potamogeton natans L.: Potamot nageant
Potamogeton nodosus POIRET: Potamot noueux
Potamogeton pectinatus L.: Potamot pectiné
Potamogeton perfoliatus L.: Potamot perfolié
Potamogeton polygonifolius POURR.: Potamot à feuilles de renouée
Potamogeton pusillus L.: Potamot fluet
Rallus aquaticus L.: Râle d'eau
Ranunculus acris L.: Renoncule âcre
Ranunculus fluitans LAM.: Renoncule flottante

Ranunculus serpens SCHRANK: Renoncule des bois
Rhizoclonium hieroglyphicum KUETZING
Rorippa amphibia BESSER: Rorippe amphibie
Rumex palustris SMITH: Patience des marais
Rumex sanguineus L.: Rumex sang-de-dragon
Salix cinerea L.: Saule cendré
Sagittaria sagittifolia L.: Sagittaire
Scilla bifolia L.: Scille à deux feuilles
Scirpus sylvaticus L.: Scirpe des bois
Scrophularia nodosa L.: Scrofulaire noueuse
Scutellaria galericulata L.: Scutellaire toque
Sitta sp: Sittelle
Senecio jacobea L.: Sénéçon jacobée
Senecio paludosus L.: Sénéçon des marais
Solanum dulcamara L.: Morelle douce-amère
Sparganium emersum REHM: Rubanier rameux
Sparganium erectum L.: Rubanier simple
Spirodela polyrhiza SCHLEID.: Lentille d'eau à plusieurs racines
Stachys palustris L.: Epiaire des marais
Succisa pratensis MOENCH: Succise de prés
Sus scrofa L.: Sanglier
Tussilago farfara L.: Tussilage
Typha angustifolia L.: Massette à feuilles étroites
Vaucheria sp: Vaucherie
Veronica anagallis-aquatica L.: Mouron aquatique
Zannichellia palustris L.: Zannichellie des marais

Liste des figures et tableaux

Figure 1: Localisation de l'étang de Virelles dans la botte du Hainaut (Belgique).....	15
Figure 2: Carte du bassin versant de l'étang de Virelles et ses sous-bassins.....	26
Figure 3: Lieux de prélèvement des échantillons d'eau dans la réserve naturelle de l'étang de Virelles du 11 juillet 2002 au 3 novembre 2004.....	28
Figure 4: Moyenne des concentrations en PO_4^{--} pour chaque site de prélèvement autour de l'étang de Virelles.....	28
Figure 5, 6 et 7: Moyenne des concentrations pour chaque site de prélèvement autour de l'étang de Virelles pour 2002, 2003 et 2004.....	28
Figures 8, 9 et 10: Evolution des concentrations en PO_4^{--} , NH_4^+ et NO_3^- du 11 juillet 2002 au 3 novembre 2004 en fonction des saisons.....	30
Figure 11: Carte de la répartition des macrophytes de l'étang de Virelles en 1989.....	35
Figure 12: Carte de la répartition des macrophytes de l'étang de Virelles en 1990.....	35
Figure 13: Carte de la répartition des macrophytes de l'étang de Virelles en 1991.....	35
Figure 14: Evolution du développement en algues, potamots à larges feuilles et potamots à fines feuilles en fonction de la limpidité de l'eau de 1989 à 1997.....	36
Figure 15: Carte de la répartition des macrophytes de l'étang de Virelles en 1994.....	36
Figure 16: Carte des lieux d'échantillonnage des macrophytes sur l'étang de Virelles.....	43
Figure 17: Lieux de prélèvement des échantillons d'eau dans la réserve naturelle de l'étang de Virelles du 14 février 2005 au 27 juin 2005.....	47
Figures 18, 19, 20, 21: Evolution des concentrations en PO_4^{--} , NH_4^+ , NO_3^- et Ptot pour les affluents de l'étang de Virelles le 14 mars 2005.....	48
Figures 22, 23, 24 et 25: Evolution des concentrations en PO_4^{--} , NH_4^+ , NO_3^- et Ptot pour les affluents de l'étang de Virelles le 17 mai 2005.....	49
Figures 26, 27 et 28: Graphiques montrant l'évolution des concentrations en PO_4^{--} , NH_4^+ , NO_3^- et Ptot pour les affluents forestiers de l'étang de Virelles entre le 14 février 2005 et le 27 juin 2005.....	50
Figures 29, 30, 31, 32, 33 et 34: Graphiques montrant l'évolution des concentrations en PO_4^{--} , NH_4^+ , NO_3^- et Ptot pour les affluents mixtes de l'étang de Virelles entre le 14 février 2005 et le 27 juin 2005.....	51
Figure 35 et 36: Graphiques montrant l'évolution des concentrations en PO_4^{--} , NH_4^+ , NO_3^- et Ptot pour les affluents provenant du village vers l'étang de Virelles entre le 14 février 2005 et le 27 juin 2005.....	52
Figures 37 et 38: Graphiques montrant l'évolution des concentrations en PO_4^{--} , NH_4^+ , NO_3^- et Ptot pour les affluents provenant du village vers l'étang de Virelles entre le 14 février 2005 et le 27 juin 2005.....	52
Figures 39 et 40: Graphiques montrant l'évolution des concentrations en PO_4^{--} , NH_4^+ , NO_3^- et Ptot pour les eaux de l'étang de Virelles entre le 14 février 2005 et le 27 juin 2005.....	53
Figures 41 et 42: Graphiques illustrant l'évolution des concentrations de chlorophylle <i>a</i> du 21 mars au 27 juin 2005 en deux points de l'étang de Virelles.....	56
Figure 43: Graphique montrant l'évolution des communautés algales au niveau du déversoir de l'étang de Virelles entre le 24 avril et le 27 juin 2005.....	60
Figure 44: Graphique montrant l'évolution des communautés algales au niveau du ponton de l'étang de Virelles entre le 24 avril et le 27 juin 2005.....	60
Figure 45: Carte illustrant les lieux d'échantillonnage de sédiment à l'étang de Virelles..	62
Figure 46: Carte de répartition des espèces de potamots dans l'étang de Virelles le 27 juillet 2004.....	63

Figure 47: Carte de répartition des espèces de potamots dans l'étang de Virelles le 23 mai 2005.....	64
Figure 48: Carte de répartition des espèces de potamots dans l'étang de Virelles le 17 juin 2005.....	64
Figure 49: Analyse non symétrique des correspondances du tableau 60 espèces de macrophytes x 52 sites de prélèvements obtenus à l'étang de Virelles le 23 mai 2005. Représentation des relevés dans le plan des deux premiers axes.....	68
Figure 50: Analyse non symétrique des correspondances du tableau 60 espèces de macrophytes x 52 sites de prélèvements obtenus à l'étang de Virelles le 23 mai 2005. Coordonnées des relevés en fonction de la position géographique sur le premier axe.....	69
Figure 51: Analyse non symétrique des correspondances du tableau 60 espèces de macrophytes x 52 sites de prélèvements obtenus à l'étang de Virelles le 23 mai 2005. Coordonnées des relevés en fonction de la position géographique sur le deuxième axe...	69
Figure 52: Analyse non symétrique des correspondances du tableau 60 espèces de macrophytes x 52 sites de prélèvements obtenus à l'étang de Virelles le 23 mai 2005. Coordonnées des relevés en fonction de la position géographique sur le troisième axe....	70
Figure 53: Analyse non symétrique des correspondances du tableau 60 espèces de macrophytes x 52 sites de prélèvements obtenus à l'étang de Virelles le 27 juin 2005. Représentation des relevés dans le plan des deux premiers axes.....	70
Figure 54: Arbre hiérarchique obtenu par classification divisive du tableau de relevé de Virelles datant du 27 juin 2005 (Technique de Berthet avec réallocation).....	72
Figure 55: Conceptualisation de l'eutrophisation selon Corell (1998).....	75
Tableau 1: Valeurs normales des paramètres climatiques dans la région de Chimay-Forges (2003).....	23
Tableau 2: Caractéristiques des sous bassins et des affluents de l'étang de Virelles (Moureau & al., 1988).....	25
Tableau 3: Succession, de mai à octobre, des différents taxons algaux présents dans l'étang de Virelles (Moureau, 1983).....	37
Tableau 4: Nombre de Chlorophyceae et de Desmidiaceae présents à Virelles en 1982 et 1983 et l'indice de Thunmark qui en découle.....	37
Tableau 5: Liste des espèces d'oiseaux trouvés dans la réserve naturelle de l'étang de Virelles et faisant l'objet d'un statut de protection particulier (Annexe 1 de la Directive 79/409/CEE).....	38
Tableau 6: Liste des animaux présents dans la réserve naturelle de l'étang de Virelles bénéficiant d'un statut de protection particulier.....	39
Tableau 7: Partie d'une feuille de terrain comprenant les différentes espèces et leur coefficient d'abondance-dominance en fonction des sites de prélèvement.....	46
Tableau 8: Classes de qualité pour trois types d'altérations (matières organiques et oxydées, nitrates et matières phosphorées) selon le SEQ-eau.....	55
Tableau 9: Tableau montrant l'évolution de la qualité de l'eau des principaux affluents de l'étang de Virelles.....	56
Tableau 10: Comparaison des quantités de chlorophylle <i>a</i> obtenues par deux techniques différentes de quantification.....	57
Tableau 11: Etat trophique d'un écosystème aquatique selon la quantité de chlorophylle <i>a</i> (VUB, 2003).....	58
Tableau 12: Résultats de l'analyse de la vase pour différents sites autour de l'étang de Virelles.....	62

Liste des annexes

- Annexe 1: Normes du C.A.R.A.H.
- Annexe 2: Analyses d'eau pour 2002-2003-2004
- Annexe 3: Analyses d'eau pour 2005 (nutriments P_{tot}, PO₄, NH₄ et NO₃)
- Annexe 4: Analyses d'eau (chlorophylle *a* par la méthode de Pechar)
- Annexe 5: Analyse d'eau (Résultats HPLC)
- Annexe 6: Analyse des sédiments
- Annexe 7: Feuilles de terrain
- Annexe 8: Coordonnées GPS des sites d'échantillonnage des macrophytes
- Annexe 9: Analyses statistiques
- Annexe 10: Liste des espèces inventoriées pour 2004 et 2005
- Annexe 11: Livret réalisé pour les observations de terrain
- Annexe 12: Photographies de l'herbier réalisé en 2004-2005

Introduction

Sans la végétation présente, le site de Virelles ne présenterait pas une biodiversité animale si impressionnante. Malgré la rareté de certaines espèces d'oiseaux en Belgique, Virelles a la chance d'en accueillir quelques-unes (Grand butor,...). Pour les garder, il est nécessaire de les protéger. Par là, on entend avoir la meilleure qualité d'eau possible. C'est à partir de ce point que toute la chaîne alimentaire se crée. Sans eau pas de producteurs primaires, sans producteurs primaires pas de poissons, sans poissons pas d'oiseaux...

J'ai réalisé mon mémoire sur le site de la Réserve naturelle de l'étang de Virelles (Chimay) en accord avec l'a.s.b.l. Virelles-Nature. Appréciant cette région, je souhaitais réaliser ce travail dans le but d'apporter ma contribution à la protection de l'étang. Le secteur conservation de la nature avait justement un sujet. Comme l'étude pratique des végétaux lors des séances de travaux pratiques s'est limitée à quelques déterminations, je trouvais très intéressant d'approfondir ce domaine.

L'étang de Virelles compte parmi les sites d'intérêt communautaire proposés par la Belgique en application de la Directive 92/43/CEE visant à la conservation des habitats naturels. En outre, le site est classé comme zone d'espace vert et figure dans les sites de grand intérêt biologique recensés en Wallonie.

La principale attente pour les gestionnaires du site était la réalisation d'un inventaire des espèces végétales aquatiques ainsi qu'une évaluation de la qualité des eaux. La liste des macrophytes servira de référence pour d'autres suivis; quant aux analyses, elles seront utilisées dans le cadre de la Charte de l'étang. Cette approche globale de l'écosystème sera un plus dans le maintien de l'équilibre du site. L'étude scientifique permettra de mettre en place diverses actions afin de revenir à un écosystème en "bonne santé".

La première partie du travail esquisse les grands traits du cadre géographique, décrit les ressources en eau du bassin versant et attire l'attention sur les problèmes de pollution du plan d'eau.

La seconde partie est exclusivement réservée au terrain. Sur place, j'ai examiné les macrophytes présents dans l'étang ainsi que les paramètres chimiques montrant le plus d'intérêt. La nomenclature utilisée se base sur la Nouvelle flore de Belgique, du Grand-Duché du Luxembourg, du Nord de la France et des régions voisines (LAMBINON & al., 2004).

Une troisième partie consiste en l'interprétation des données obtenues sur les nutriments, les macrophytes et les groupements algaux de l'étang. Les associations macrophytiques feront l'objet d'analyses statistiques.

A la fin de ce travail je devrais pouvoir identifier les macrophytes présents près des plans d'eau et évaluer la qualité de l'eau sur base de paramètres physico-bio-chimiques.

1. Le milieu d'étude

1.1. L'étang de Virelles

1.1.1. Localisation et origine de l'étang

L'étang de Virelles se situe dans la botte du Hainaut au nord-est de Chimay à la limite de la Calestienne et de la Fagne. Les sous-sols sont de diverses natures, ceci explique la richesse et la diversité du site.

La réserve naturelle couvre 133 ha 37 a dont 78 ha 7 a correspondent au plan d'eau. Elle se situe entre 50°02'30'' et 50°05' de latitude Nord et entre 4°20' et 4°22'30'' de longitude Est.

Le plan d'eau est artificiel, il a été aménagé au XVI^e siècle dans une dépression humide de la Fagne dans le but de constituer un réservoir d'eau pour les besoins de l'industrie métallurgique locale.



Figure 1: Localisation de l'étang de Virelles dans la botte du Hainaut (Belgique)

Une simple digue, construite au travers du Ry Nicolas, a suffi pour former ce vaste plan d'eau dont la profondeur moyenne est de 1,4 m. Une forge, un moulin à écorces et une petite scierie ont été installés au pied de cette digue et ont bénéficié de venues d'eau fournissant une importante force motrice. Le trop-plein se déverse dans l'Eau Blanche, au pied du bois de Blaimont.

Une dizaine de ruisseaux alimentent l'étang dont le bassin hydrographique s'étend sur environs 3000 hectares. Le Ry Nicolas est le plus important d'entre eux. Ces petits affluents proviennent principalement des vastes forêts qui occupent la dépression de la Fagne ainsi que de quelques prairies (CARLIER & al., 1984).

Les eaux sont de type famennien, légèrement basiques (pH 7,3) et moyennement minéralisées. La faible profondeur de l'eau, sa richesse en éléments nutritifs et son alcalinité caractérisent un milieu aquatique eutrophe (SYMOENS, 1957).

1.1.2. Le sauvetage du site

Toutes les pratiques commerciales et culturelles autour du plan d'eau ont conduit à une dévaluation du site, qui, en 1981 était à louer ou à vendre. De nouvelles menaces pesèrent alors sur le site en raison de l'intérêt manifesté par des promoteurs immobiliers. S'intéressant depuis longtemps au domaine et ayant pris connaissance de l'urgence de la situation, les naturalistes ont décidé d'agir. Les associations AVES, R.N.O.B. et W.W.F tentèrent de réunir les fonds nécessaires pour continuer à louer le domaine de Virelles mais sans y parvenir.

La solution vint en 1985 lorsque Fortis banque (anciennement la Générale de Banque) acquit le site pour le céder immédiatement à titre gracieux aux trois associations sous forme d'un bail emphytéotique de 99 ans.

L'exploitation touristique était assurée par la s.p.r.l. "Virelles-Nature", tandis que l'a.s.b.l. "Virelles-Nature" s'occupait de la gestion naturaliste. Quelques années plus tard, ces deux organismes ne formèrent plus qu'une seule et même a.s.b.l. "Virelles-Nature" prenant en charge la gestion et l'exploitation du domaine.

Cette politique de consolidation du domaine a bénéficié de subventions de la Région Wallonne et de la Commission des Communautés Européennes (C.C.E.) dans le cadre des Actions Communautaires pour l'Environnement (A.C.E.).

Le conseil de gestion est établi en 1988. Il est chargé de la gestion et de l'exploitation du domaine avec l'aide d'une commission scientifique où siègent des experts de différentes disciplines. Les objectifs poursuivis par le conseil sont repris dans trois secteurs de l'a.s.b.l., à savoir la conservation de la nature, l'éducation et le tourisme.

1.1.3. Le plan de gestion de la réserve naturelle

La gestion scientifique d'un domaine tel que Virelles ne se fait pas au hasard. Elle nécessite de bien connaître les différents milieux et de comprendre les phénomènes qui s'y déroulent.

Les études et les prospections réalisées par les naturalistes et les scientifiques ainsi que les observations rapportées par des bénévoles constituent une quantité impressionnante d'informations. La mise en commun de toutes ces données a permis de dresser l'inventaire biologique des divers milieux et de définir les problèmes propres à chacun de ces milieux.

L'intégration de toutes ces informations a abouti en 1988 à l'élaboration d'un plan de gestion. Celui-ci définit les mesures à prendre pour restaurer ou préserver la richesse de chaque biotope.

1.1.3.1. Principes généraux de la gestion

1. La gestion de l'étang de Virelles et de ses abords doit viser avant tout à la conservation des paysages traditionnels caractéristiques de la région (Calestienne et Fagne). La diversité des milieux doit être avant tout préservée.

2. Les berges doivent rester en pente douce et ne peuvent être recreusées. Il importe de favoriser, en été et au début de l'automne, une baisse sensible du niveau des eaux. On retrouve ainsi le type de gestion pratiqué jadis, au moment où l'étang devait fournir l'eau nécessaire aux établissements métallurgiques situés en contrebas de la digue.
3. L'étang doit garder ou retrouver une eau de qualité, c'est-à-dire correspondant aux conditions imposées par la géologie, la géomorphologie, la pédologie et l'occupation traditionnelle de tout son bassin versant. Elle ne doit en aucune manière être polluée par l'apport d'eaux usées ou chargées en éléments eutrophisants, quelle que soit leur origine.
4. Une attention particulière doit être apportée aux peuplements végétaux d'hélophytes et d'hydrophytes car ils constituent la base de la chaîne trophique de l'étang, mais leur développement doit rester spontané.
5. L'étang sera géré en pisciculture extensive, avec vidange automnale complète et remise sous eaux printanières selon un cycle qui reste à déterminer. Les populations de poissons seront soumises à un suivi scientifique précis. Les repeuplements concerneront uniquement les espèces indigènes non manipulées génétiquement.
6. La roselière à *Phragmites australis* (Roseaux commun) sera gérée en vue de la maintenance du stade "roselière jeune et dynamique, à roseaux forts". Si cela se révèle possible, son extension sera recherchée dans la direction de l'étang.
7. Sur les rives nord, est et sud-est, les forêts inondées et inondables ainsi que les cariçaies qui bordent l'étang doivent être, sauf exceptions limitées, traitées en réserve naturelle intégrale.
8. Une gestion traditionnelle (notamment fauchage du tapis herbacé trop dense et enlèvement de la recolonisation forestière, suivis dans les deux cas de l'exportation des matériaux) sera pratiquée afin de maintenir de vastes surfaces de prairies semi-naturelles fagnardes sur la rive nord de l'étang.
9. Dans la partie occidentale de l'étang, des interventions seront réalisées, visant à accroître la diversité et la richesse des biotopes (coupe forestière, fauchage des vieilles roselières, extension des zones dégagées à mégaphorbiaies,...).
10. Tout acte de gestion ne peut être posé que dans le cadre du plan général de gestion et doit faire l'objet d'un suivi scientifique rigoureux.
11. La protection paysagère du domaine et de ses abords au sens le plus large doit être assurée par des opérations foncières ou par des mesures réglementaires comme le classement des sites. On doit également prévoir, dans cet environnement privilégié, la création de réserves naturelles supplémentaires, éventuellement à but didactique.
12. La zone consacrée à la récréation et à l'accueil du public doit conserver en priorité son aspect esthétique de parc.
13. En ce qui concerne l'utilisation de Virelles à des fins didactiques et éducatives, il faut

donner la priorité aux excursions sur les rives méridionale et occidentale de l'étang ainsi qu'à la visite des abords du village de Virelles, du bois de Blaimont,... Les parties nord-occidentale, nord et orientale du site de l'étang, zones assez sensibles, sont réservées aux seuls visiteurs déjà en possession d'un sérieux bagage naturaliste.

1.1.3.2. Les différents milieux et leur environnement

Le domaine se divise en trois zones selon les types de milieux naturels et l'accessibilité au public.

La **réserve intégrale** évolue de façon naturelle, l'intervention humaine y est bannie.

La **réserve dirigée** peut subir des travaux afin de maintenir les milieux dans un stade déterminé.

Le **parc touristique** applique un mode de gestion permettant de se rapprocher au maximum du milieu naturel tout en conciliant protection et découverte.

1.1.3.2.1. La réserve intégrale

Cette zone regroupe les rives nord, est et sud-est de l'étang jusqu'au déversoir. L'accès y est limité à des visites en groupe restreint accompagné de guide confirmé, à la surveillance ou aux études scientifiques. La règle d'or est que la nature doit y évoluer selon ses propres lois.

Sur les rives nord et est, bordées par la forêt de la Fagne, on retrouve la succession de divers groupements forestiers en fonction de l'humidité croissante du substrat. De la forêt vers l'étang se succèdent une chênaie-charmaie, une frênaie-aulnaie, une aulnaie à *Carex elongata* (Laîche allongée) et d'une saussaie à *Salix cinerea* (Saulx cendré) sur les sols inondés. Vers l'eau libre s'avancent plusieurs ceintures de *Phragmites australis*. Une zone ouverte marécageuse subsiste à l'embouchure du Ry Nicolas.

La forêt fagnarde constitue un environnement de qualité et accroît la diversité des espèces végétales et animales vivant aux abords de l'étang. Sur ces sols schisteux se développe une végétation de sous-bois, où l'on rencontre, entre autres, *Ranunculus serpens* (Renoncule des bois). Outre l'avifaune forestière typique (sitelles, mésanges, pics...), plusieurs espèces de rapaces diurnes y nichent: la buse variable, la bondrée apivore, l'autour des palombes et l'épervier. Chevreuils et sangliers y vivent et font parfois des incursions dans la réserve naturelle.

Le complexe marécageux dans lequel serpente le Ry Nicolas est le siège d'une vie intense. *Phalaris arundinacea* (Baldingère) domine et en périphérie se développent plusieurs espèces de laîches. Cet endroit sert de refuge et de repos pour les hérons et les canards mais aussi de site de reproduction pour la rousserolle effarvée et le bruant des roseaux. Plusieurs espèces de libellules venant pondre dans les criques peu profondes et les vasières exondées attirent les limicoles.

1.1.3.2.2. La réserve naturelle dirigée

a) La roselière

Des ceintures de *Phragmites australis* bordent la rive nord et quelques surfaces des rives est et sud-est de l'étang mais la formation la plus importante occupe la zone ouest.

En contraste avec la prairie humide et le pré de Fagne, très riches en espèces végétales, la roselière offre moins de diversité. Les tiges peuvent atteindre 3,50 m de haut et pousser dans 50 cm d'eau. Cette plante étale dans la vase de longs rhizomes qui tissent un réseau épais et ferme. Elle se propage par des stolons flottants qui s'entrelacent et forment un feutrage compact. La densité des tiges laisse trop peu de lumière au sol pour que d'autres plantes puissent y grandir. Seules quelques espèces telle *Senecio paludosus* (Sénéçon des marais) se maintiennent dans les trouées.

Pauvre en espèces végétales, la roselière est en revanche bien plus riche au niveau ornithologique. Plusieurs espèces d'oiseaux sont strictement inféodées à ce milieu particulier et leur régression est directement imputable à la raréfaction de ce milieu.

Le plan de gestion prévoit le fauchage hivernal de la roselière à l'exception d'une bande témoin de plus ou moins 3 hectares (20% de la superficie totale). La surface à faucher est traitée en plusieurs parcelles gérées en rotation, de manière à toujours conserver une surface importante de roseaux secs jusqu'au printemps. Le bruant des roseaux et la rousserolle effarvatte, dont les populations nicheuses sont encore importantes, construisent leur nid dans les tiges sèches de l'année précédente. Le but de ce fauchage est de freiner l'évolution naturelle vers le boisement et de stimuler la régénération des phragmitaies.

b) Les cariçaies et prairies humides

A l'arrière de la grande roselière, les zones ouvertes, jadis fauchées pour la litière ou entretenues à des fins synergiques, se sont réduites sous la pression de la forêt. Des travaux de déboisement ont débuté en 1984 dans une "clairière" où la reforestation était moins avancée. Une surface de plus d'un hectare a été dégagée des aulnes et des saules qui l'envahissaient. L'apport de lumière dû à cette action a rapidement permis l'extension de grandes plantes comme *Filipendula ulmaria* (Reine-des-prés), *Epilobium hirsutum* (Epilobe hérissé) ou *Phalaris arundinacea*. Ces espèces dynamiques sur des sols enrichis en matière organique constituent une mégaphorbiaie. Chaque année, afin de limiter leur propagation, la parcelle est fauchée avant la maturation des graines tout en conservant une bande témoin (Philippart, 1990).

Peu à peu cette pratique favorise une diversification: *Filipendula ulmaria* régresse au profit de *Iris pseudacorus* (iris des marais), *Lysimachia vulgaris* (Lysimaque commune), ...

Ce milieu constitue un terrain de chasse idéal pour le Grand butor, le Héron cendré, le Râle d'eau et même la Marouette ponctuée.

c) Le pré de Fagne

Sur la rive nord-ouest subsiste une étroite parcelle coincée entre la chênaie-charmaie fagnarde et la roselière. Fragment de prairie typique de la Fagne, ce milieu semi-naturel créé par le défrichement de la forêt primitive, puis exploité comme pré de fauche, était délaissé et envahi par les arbres. Ce trésor botanique a échappé au sort subi par la plupart des terres marginales de la région qui ont été converties en prairies permanentes grâce à l'apport d'engrais. Seule la présence de quelques pins témoigne de l'échec d'une tentative de plantation artificielle.

La gestion actuellement menée remet à l'honneur une pratique abandonnée depuis plusieurs années. Le défrichement graduel suivi en fin d'été par une fauche favorise la

reconstitution d'associations végétales typiques de ces sols schisteux qui subissent une importante variation annuelle du niveau d'eau.

Cette méthode a permis le retour de plantes disparues. De la forêt fagnarde à la roselière, des sols les plus secs aux sols les plus humides, se trouve une admirable succession floristique et faunique.

Une lande à bruyère et quelques zones de pelouse à *Nardus stricta* (Nard) se situent en lisière du bois et sont fréquentées par des lézards vivipares et des orvets.

Les sols humides accueillent *Succisa pratensis* (Succise des prés), diverses espèces de joncs, des laîches ainsi que des orchidées.

Les sols inondés sont occupés par *Lysimachia vulgaris*, *Lythrum salicaria* (Salicaire), *Angelica archangelica* (Angélique vraie) et beaucoup d'autres espèces.

Une faune particulière reste bien entendu inféodée à ces trois types principaux de substrat.

1.1.3.2.3. Aménagement de la partie touristique

Le sud du domaine est consacré au public. Un parc, des prairies et des infrastructures d'accueil forment la zone touristique. C'est ainsi qu'il est possible de se promener au fil des différents centres d'intérêts, qu'une plaine de jeu fait le bonheur des enfants et que l'on peut se restaurer comme dans n'importe quel autre site touristique.

Mais à Virelles, la découverte de l'environnement et du milieu naturel est aussi un moteur touristique important. Voilà pourquoi des infrastructures à vocation éducative ont été restaurées ou installées. De plus, un circuit découverte de la nature offre la possibilité de découvrir les principales richesses naturelles du domaine (la roselière, les mares,...).

1.1.4. La charte de l'étang et ses projets d'actions

1.1.4.1. Définition de la charte étang

La "Charte de l'étang " est un document d'orientation, synthétique, où sont consignés les grands principes que les acteurs s'engagent à appliquer en vue d'améliorer la qualité de l'étang, en l'occurrence celui de Virelles.

Ce document synthétique est complété par une liste d'actions concrètes, menées chacune par un ou plusieurs acteurs, en application des principes de la Charte.

La liste des actions est évolutive d'année en année en fonction des résultats précédents et des priorités. La liste annuelle est acceptée et signée par tous les acteurs. La Charte, par contre, reste inchangée.

Etant donné l'hydrographie du bassin versant, l'action Charte de l'étang a été choisie plutôt que la mise en place d'un contrat de rivière sur le Ry Nicolas. En effet, les apports en eau vers l'étang ne sont pas issus d'un seul affluent, passer des contrats de rivière sur chacun d'eux serait possible mais peu efficace en ce qui concerne la lutte contre l'eutrophisation. Même si le Ry Nicolas apporte près de 65 % de l'eau déversée dans l'étang, il n'est pas la cause principale de l'enrichissement du plan d'eau.

L'apport en matières eutrophisantes vers l'étang n'est pas l'exclusivité des ruisseaux se jetant dans le plan d'eau, il faut également tenir compte de l'ensemble des rejets d'eaux usées domestiques en provenance des parties est et ouest de l'étang.

1.1.4.2. Les étapes successives de la réalisation de la Charte

a) Première phase: définition des objectifs

Tout d'abord, le contexte de l'action a dû être situé pour chaque acteur (milieu, contraintes, problèmes rencontrés) afin de préciser et d'insérer la problématique dans un schéma d'ensemble.

Par la suite, des tables rondes ont été organisées et le seront encore pour que les différents acteurs comparent leurs contextes et leurs problématiques propres, de façon à ce qu'aucun d'entre eux ne voie sa responsabilité épinglée en particulier mais que tous y perçoivent l'unicité de la lutte pour l'environnement.

Une liste d'actions a ensuite été préparée, dans laquelle chaque acteur détaille les mesures qu'il envisage pour remédier aux pollutions chroniques (essentiellement domestiques) et ponctuelles (surtout agricoles), soit à titre individuel, soit en partenariat (actions cogérées). La table ronde se met alors d'accord quant à la priorité à donner aux actions proposées et établit un calendrier de réalisation.

Ces actions sont destinées à trois catégories d'acteurs du bassin versant: les riverains, les gestionnaires du domaine de Virelles et les agriculteurs. Elles ont été regroupées par thème et chaque thème englobe une ou plusieurs fiches d'actions.

Les riverains

- ◆ Le compostage
- ◆ Les produits ménagers plus respectueux de l'environnement
- ◆ La consommation d'eau
- ◆ L'épuration des eaux par les végétaux

Les gestionnaires du domaine de Virelles

- ◆ Le clôturage des prairies
- ◆ L'épuration des eaux usées des infrastructures de Virelles
- ◆ L'implantation de zones à macrophytes en amont de l'étang
- ◆ L'implantation de zones à macrophytes en aval de l'étang
- ◆ Une zone d'épuration domestique
- ◆ Une mise en assec partielle de l'étang
- ◆ L'évacuation des cendres résultant des chantiers concernant les roselières

Les agriculteurs

- ◆ Les prairies: diminuer la charge en pâturage
installer des affouragements et des abreuvoirs
la gestion (fauche et restauration)

les aménagements (clôtures et zones de protection des cours d'eau)
la fertilisation et la gestion des effluents

- ◆ Les cultures: les intercultures (pièges à nitrates)
le maïs (sous-semi, fertilisation localisée)
les zones de protection (haies et tournières)
la fertilisation et la gestion des effluents
- ◆ Le stockage: la mise aux normes (nouveaux et anciens bâtiments)
le compostage
le zéro pâturage

b) Deuxième phase: mise en œuvre des projets

L'ensemble des actions que les acteurs s'engagent à respecter en vue de diminuer les apports eutrophisants vers l'étang ont été mis en place avant la fin 2004.

Une fois les projets établis et choisis, ils sont réalisés par les acteurs ou éventuellement en co-gestion. Un suivi périodique permet de constater l'avancement des travaux afin d'adapter les projets en fonction de leur faisabilité technico-économique et de l'évolution des connaissances.

c) Troisième phase: évaluation des projets

Toujours via des tables rondes, les projets arrivant à terme ou bien étant en cours de réalisation sont évalués à échéances régulières (un à deux mois par an et quatre mois en fin de contrat).

1.1.4.3. Conclusion

Le projet de la Charte s'inscrit dans le cadre du développement durable du bassin versant de l'étang. Les actions préconisées dans ce texte ne sont pas uniquement destinées à la défense d'un site protégé par des frontières, réelles ou fictives, ou par des statuts de protection du milieu naturel.

Outre ses nombreux avantages d'amélioration de la qualité des eaux de l'étang et de son bassin versant, celle-ci devrait offrir l'opportunité à chaque acteur, agriculteurs et riverains, de participer ensemble à la lutte contre l'insularisation par la création d'un maillage écologique au travers du bassin versant et de toute la région.(Présentation de la Charte de l'étang de Virelles, NITRAWAL)

1.2. Les facteurs abiotiques

La connaissance de ces critères permet de caractériser l'étang et son bassin versant et d'en déterminer l'identité propre afin d'établir des mesures de conservation qui lui soient adaptées.

1.2.1. Aperçu climatologique

Le bassin versant étudié se situe dans l'Entre-Sambre-et-Meuse et plus précisément dans la Fagne de Chimay.

Du point de vue phytogéographique, il est localisé dans le district mosan du domaine subatlantique, soit dans la région naturelle dite "schisto-calcaire". Ce district forme un territoire de transition caractérisé par un climat intermédiaire entre celui de la Moyenne-Belgique et celui de l'Ardenne ainsi que par une flore qui comprend des éléments atlantiques, subatlantiques et montagnards (LAUDELOUT & al., 1984).

◆ Pluviométrie

La moyenne annuelle des précipitations atteint 1044 l/m², celle-ci est supérieure à la moyenne nationale qui est de 800 l/m². Les maxima se situent en décembre et les minima en avril.

◆ Température

La température moyenne annuelle (sous abri) est de 8 °C. En juillet, la température moyenne atteint 15,8 °C, tandis qu'en janvier, elle ne dépasse pas 0,4 °C. Il gèle en moyenne 93 jours par an: la première a lieu fin octobre et la dernière début mai.

◆ Ensoleillement

La durée d'insolation est en moyenne de 1541 heures par an.

◆ Vents

Le vent a une vitesse moyenne de 14 km/h. Les vents dominants soufflent du secteur ouest.

Valeurs normales (moyennes sur plusieurs années)

des températures maximale, minimale et moyenne journalière : moyennes mensuelles et annuelle

des précipitations : totaux mensuels et annuel

de la durée d'insolation : totaux mensuels et annuel

de la vitesse moyenne du vent : moyennes mensuelles et annuelle

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Température maximale (en °C)	2,9	4,5	7,4	11,6	15,7	18,9	20,5	20,1	17,8	12,7	7	3,4	11,9
Température minimale (en °C)	-2,2	-1,6	0	3	6	9,2	11,1	10,9	8,6	5	1,5	-1,1	4,2
Température moyenne (en °C)	0,4	1,4	3,7	7,3	10,8	14	15,8	15,5	13,2	8,8	4,3	1,1	8
Précipitations (en l/m²)	100	80	77	71	76	78	84	86	87	97	101	107	1044
Insolation (en heures)	48	73	124	158	202	195	205	171	150	119	57	39	1541
Vitesse du vent (en km/h)	16	15	17	14	12	12	11	10	12	14	14	17	14

Nombre moyen de jours de gel dans l'année

: 93

Date moyenne de la première gelée (jour/mois)

: 29/10

Date moyenne de la dernière gelée (jour/mois)

: 01/05

Date moyenne de la première neige au sol (jour/mois)

: 26/11

Date moyenne de la dernière neige au sol (jour/mois)

: 01/04

Tableau 1: Valeurs normales des paramètres climatiques dans la région de Chimay-Forges (2003)

1.2.2. Contexte géomorphologique

Comme déjà indiqué précédemment, une des grandes originalités du site de Virelles tient à sa situation sur la Fagne au nord et la Calestienne au sud. Ces deux paysages ont une assise géologique datant de l'ère primaire et reposent sur ce que l'on nomme le socle paléozoïque.

La Fagne dispose d'un sous-sol constitué de schistes. Les dépressions y alternent en fonction de la dureté de la roche. Cette région est caractérisée par un vaste couvert forestier, dont de nombreuses chênaies.

La Calestienne, au sud, se développe d'ouest en est sur une largeur d'une dizaine de kilomètres. Elle est composée de trois assises géologiques principales: le frasnien du dévonien supérieur, le givetien et le couvinien du dévonien moyen. Elles ont été nommées de cette façon selon l'endroit où elles furent découvertes et dont elles sont caractéristiques.

Le frasnien constitue l'assise nord de la Calestienne. Elle est composée de schiste calcarifère et d'anciens récifs coralliens datant de 350 Ma. Les récifs calcaires persistants forment des buttes arrondies très résistantes à l'érosion. (Carte des sols de Belgique, Chimay)

Le givetien est localisé au centre de cette bande calcaire. Il est constitué de roches calcaires présentant des fissures horizontales et verticales par lesquelles, l'eau de pluie acidifiée par le dioxyde de carbone et les acides humiques, peut aisément s'infiltrer.

Le couvinien formé de sols calcaires et schisteux, délimite la partie sud de la Calestienne.

Remarquons que cette région géologique comprend bon nombre de terres à vocation agricoles.

L'Ardenne commence au sud de la Calestienne. Elle se trouve à une altitude plus importante et est constituée de grès. Dans cette région alternent prairies et couvertures forestières (essentiellement d'épicéa).

1.2.3. Contexte hydrogéologique

Le bassin hydrographique de l'étang couvre une superficie de 2997 hectares et peut être divisé en trois parties (tableau 2).

La plus importante, **au nord**, est constituée par le bassin du Ry Nicolas (2150 ha), affluent principal qui prend sa source à 7,7 km de l'étang.

A l'est se situe un bassin de cinq affluents de moindre importance. Trois affluents sont exclusivement forestiers tandis que les deux autres sont mixtes (prairies et forêts). L'ensemble donne une superficie totale de 347 ha.

A l'ouest, on retrouve un assemblage plus ou moins artificiel de ruisseaux et de fossés de drainages (500 ha).

Les eaux du site se déversent dans l'Eau Blanche, au pied du bois de Blaimont. L'Eau Blanche rejoint l'Eau Noire à Dourbes (commune de Viroinval) au pied de la Roche à L'Homme pour donner naissance au Viroin qui se déverse dans la Meuse à Vireux-Molhain (France).

		<u>Points de mesures</u>	<u>Aire du bassin versant en amont des points de mesure</u>	<u>Débit par rapport au total des apports vers l'étang</u>	<u>Remarques</u>
<u>Bassin du Ry Nicolas</u>		1	2150 ha 67,9%	65%	Bassin mixte, 43% forestier
<u>Bassin est</u>	Forestier	2	27 ha	4%	Bassin forestier
		3	24 ha		
		4	12 ha		
			2%		
<u>Bassin est</u>	Mixte	5	123 ha	8%	Bassin mixte récoltant des eaux usées, 57% forestier
		6	161 ha		
<u>Bassin ouest</u>		8	25 ha	0,50%	Bassin récoltant des eaux usées
		9			
		10			
		11	75 ha	17%	Bassin mixte, 45% forestier
		11 nord	15%		
		11 sud			
	12	400 ha			

Tableau 2: Caractéristiques des sous bassins et des affluents de l'étang de Virelles (Moureau & al., 1988)

1.2.3.1. Le bassin du Ry Nicolas (bassin A fig.2)

Le sous-sol est constitué d'assises du dévonien supérieur (étage famennien inférieur) appelées assises de Senzeilles, de Mariembourg et d'Esneux. Formé de schistes verdâtres ou violacés, on trouve localement la présence de l'assise du Souverain-Pré du famennien supérieur.

Les sols des versants sont limono-caillouteux à drainage imparfait; ils sont occupés par des forêts ou des prairies humides l'hiver et sèches l'été.

Les sols des vallées sont argileux et marqués par un excès de ruissellement. C'est le domaine des forêts humides, de l'aulne et des prairies gorgées d'eau en période pluvieuse. Localement, des plages de sols limoneux de faibles épaisseurs sont présentes. Soumises à des

alternances d'engorgement et de dessiccation, les possibilités agricoles y sont limitées; c'est la raison pour laquelle on y trouve peu de cultures. (Carte des sols de Belgique, Chimay)

Ce bassin comporte au total 43 % de forêts et est le milieu de prédilection d'une chênaie-charmaie.

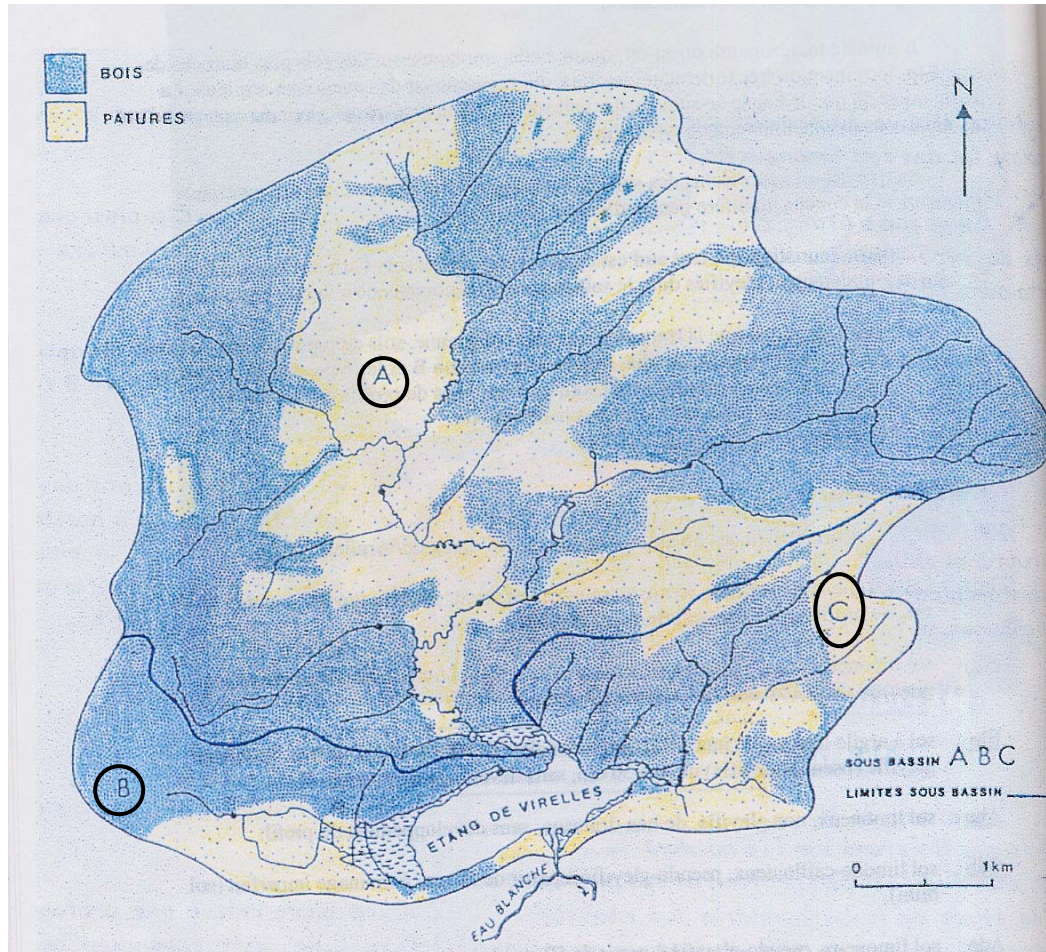


Figure 2: Carte du bassin versant de l'étang de Virelles et ses sous-bassins

1.2.3.2. *Le bassin ouest* (bassin B fig.2)

Ce bassin se situe à la fois sur la Fagne et sur la Calestienne. Du nord au sud, on rencontre successivement les assises de Mariembourg et de Senzeille, suivies de l'étage frasnien avec des schistes de Matagne, très feuilletés et foncés, puis des schistes noduleux et enfin des calcaires stratifiés massifs ou noduleux.

Etant donné la texture argileuse et le drainage insuffisant, la dépression et le versant nord présentent un engorgement superficiel au début de l'automne et à la fin du printemps.

A proximité immédiate de l'étang, le sol est constitué d'alluvions modernes provenant des vallées. Le versant sud est caractérisé par des sols limono-caillouteux pouvant souffrir des périodes de sécheresse. Le sommet est occupé par des boisements de pins typiques de la Calestienne et des fourrés de prunelliers. (Carte des sols de Belgique, Chimay)

On y trouve un réseau relativement complexe de fossés plus ou moins naturels auxquels s'ajoutent d'anciens fossés de drainage à ciel ouvert. Deux tendances cependant se dégagent. La première est représentée par le Ry Cécelle (12) qui collecte les eaux de la forêt fagnarde (environ 178 ha) et des prairies de la dépression. La seconde, caractérisée par les points de prélèvements 8, 9, 10, 11, 11 nord et 11 sud, recueille indirectement les eaux usées des maisons situées au nord du village de Virelles. Ces derniers apports séjournent momentanément en bordure de l'étang, où de petits barrages de décantation ont été installés avant de traverser la roselière pour atteindre finalement l'eau libre.

1.2.3.3. Le bassin est (bassin C fig.2)

Ce bassin est constitué de trois petits affluents (2, 3 et 4) purement forestiers et de deux affluents (5 et 6) mixtes prairies-forêts.

Les trois bassins forestiers sont situés sur l'assise de Mariembourg constituée de schistes souvent violacés et de psammites ; les sols y sont argileux, de texture lourde et à drainage naturel déficient.

Le premier des bassins mixtes (5), d'environ 123 ha, présente le même type de sol et de sous-sol que les précédents mais comprend 43 % de prairies.

Le deuxième (6), d'environ 161 ha, possède un sous-sol constitué des assises de Mariembourg et de Senzeille, à schistes souvent verts ou noduleux ou à schistes violacés avec psammites. Les sols, qu'ils soient argileux, limoneux ou limoneux à charge schisteuse, sont caractérisés par un drainage relativement faible. Ce ruisseau nommé "Fond des Sarts" récolte aussi les eaux usées d'une partie des maisons situées sur le bassin est. Ce sont typiquement des sols de prairie. La forêt ne recouvre que 30 % de ce bassin.

1.2.4. Qualité physico-chimique des eaux

1.2.4.1. Profil des nutriments

L'objectif de ce point est l'étude des apports eutrophisants par les affluents. Vu l'absence de rejets industriels dans les eaux de l'étang, une attention particulière a été portée au phosphore et à l'azote. Ces deux paramètres régulent la structure et la composition des phytocénoses aquatiques. Seuls les PO_4^{3-} , les NH_4^+ et les NO_3^- ont été dosés. (LEE, 1973)

La pollution atteignant l'étang par le bassin ouest (pollution d'origine ménagère) est une source polluante quotidienne. Les pollutions mettant directement en cause certaines pratiques agricoles (déversement de lisier aux abords des affluents de l'étang) ou indirectement (apports de polluants par les eaux de ruissellement) sont des sources saisonnières, voir ponctuelles, d'où l'importance de la régularité des analyses tout au long de l'année.

1.2.4.1.1. Résultats en relation avec le lieu de prélèvement

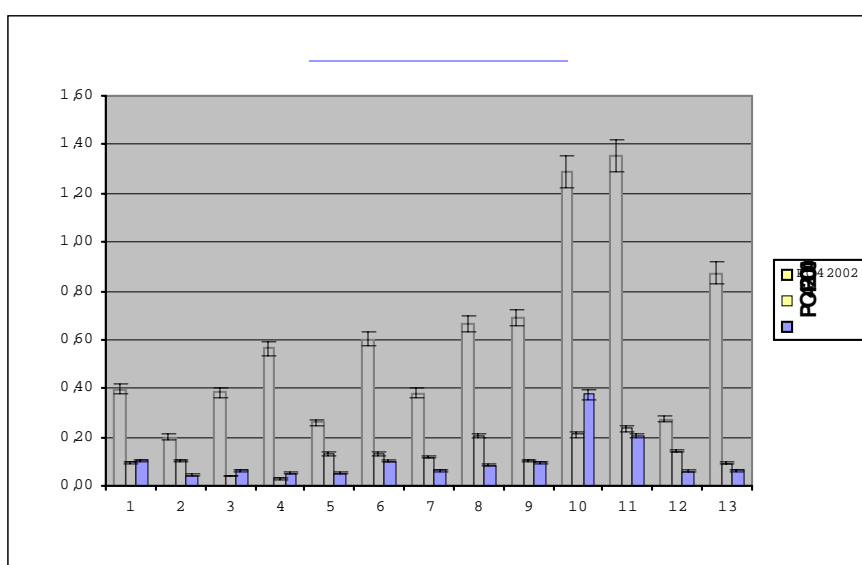
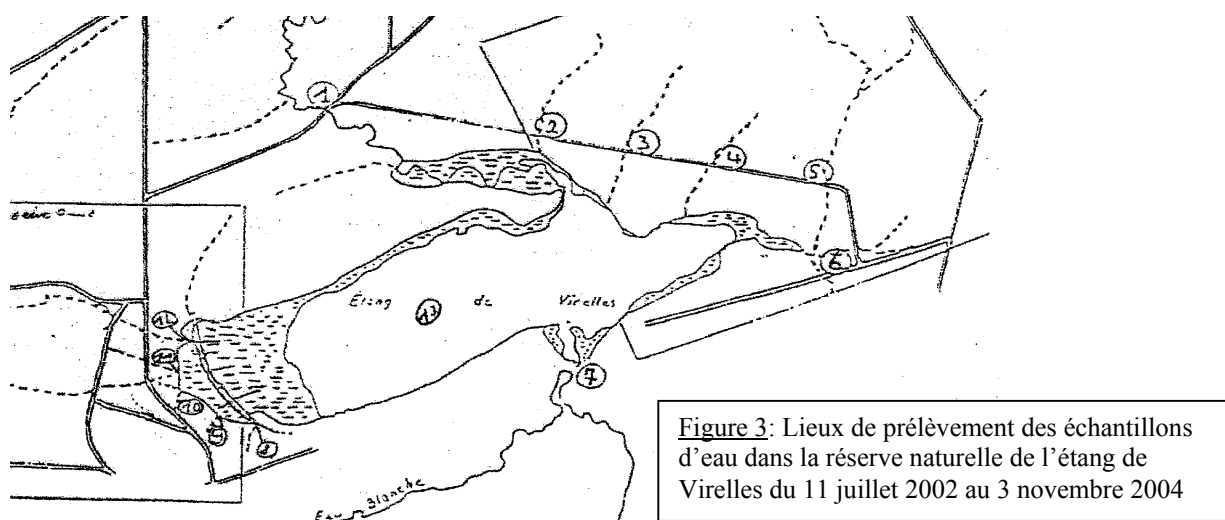
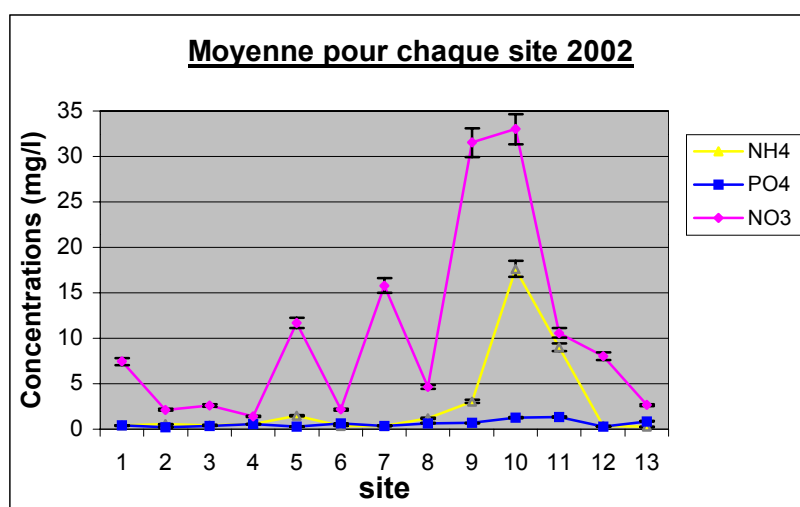
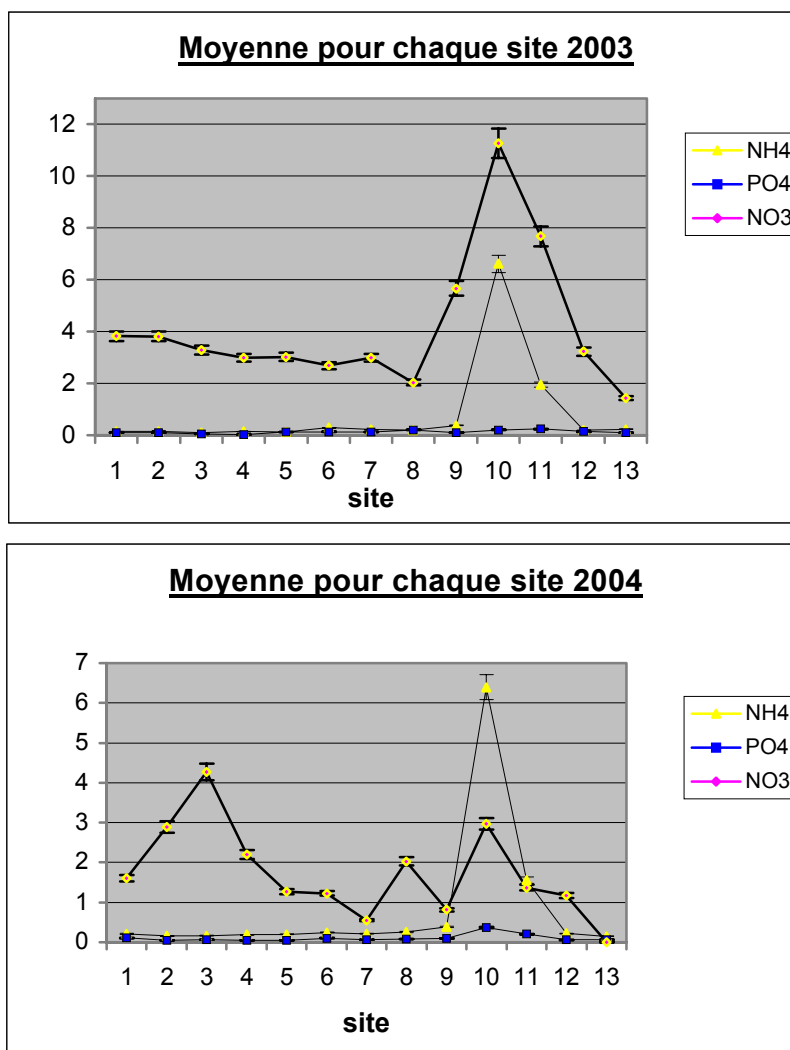


Figure 4: Moyenne des concentrations en PO_4^{3-} pour chaque site de prélèvement autour de l'étang de Virelles





Figures 5, 6 et 7: Moyenne des concentrations pour chaque site de prélèvement autour de l'étang de Virelles pour 2002, 2003 et 2004

Les concentrations en azote et en phosphore sont nettement plus élevées à la station 10 (rive ouest). Elles sont près de dix fois supérieures aux autres points. Ces concentrations peuvent varier fortement au cours du temps car elles sont liées aux activités humaines. Il faut signaler que les eaux de cette station proviennent des fossés d'égouttage d'un quartier du village. Il se forme ainsi un réseau d'eaux usées qui transite à l'intérieur de la réserve naturelle par un système de lagunes et de zones marécageuses. Il est rejoint par les eaux des ruisseaux 9 et 11 amenant une charge assez élevée en nitrates.

En ce qui concerne la rive est, le taux de nitrate et d'ammonium des ruisseaux 2, 3 et 4 reste constant au cours du temps. Par contre, les phosphates fluctuent (0,2 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{l}$ en 2002, 0,11mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{l}$ en 2003 et 0,045mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{l}$ en 2004). Il s'agit d'une eau purement forestière à trajet fort court pouvant être considérée comme référence. Cependant, pour 2004, il contient plus de nitrate que le Ry Nicolas (point 1). Ceci montre qu'il ne faut pas sous-estimer l'influence de la litière forestière.

Les ruisseaux 5 et 6, contrairement aux précédents, drainent des prairies avant de traverser

la forêt, ce qui se manifeste par une élévation du taux d'azote (12 mg NO_3^-/l pour le 5 contre 2 mg NO_3^-/l pour le 2 en 2002) et de phosphore (0,6 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{l}$ pour le 6 contre 0,2 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{l}$ pour le 2).

1.2.4.1.2. Evolution des concentrations en NO_3^- , NH_4^+ et PO_4^{3-} de 2002 à 2004

Les premières valeurs datent du 11 juillet 2002 et les dernières du 3 novembre 2004. J'ai subdivisé les 12 mois de l'année en 4 saisons distinctes:

- du 21 décembre au 20 mars : Hiver (H)
- du 21 mars au 20 juin : Printemps (P)
- du 21 juin au 20 septembre: Eté (E)
- du 21 septembre au 20 décembre: Automne (A)

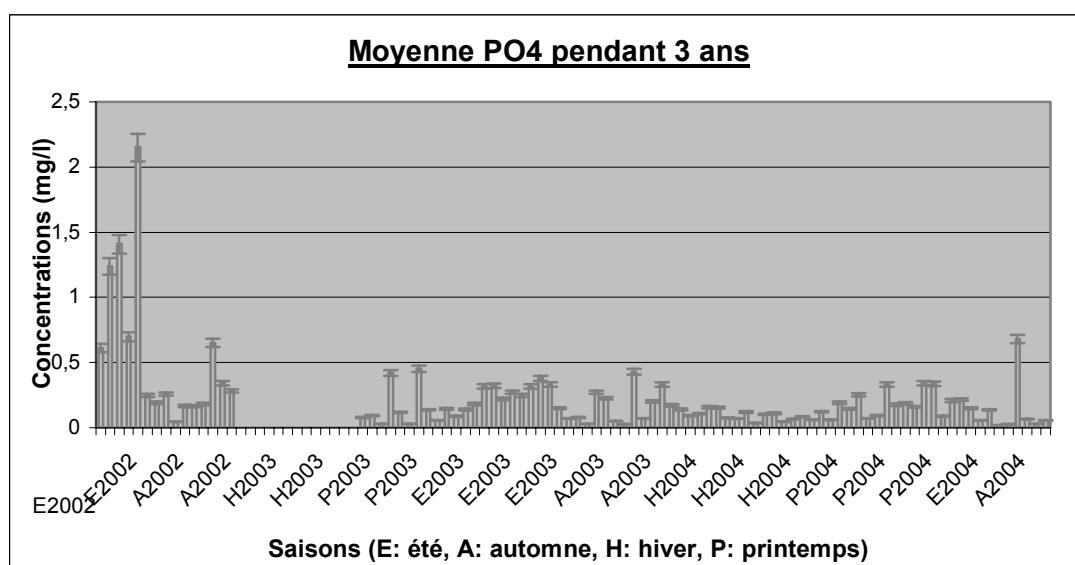
La majorité du **phosphore** se trouve dans l'étang sous forme organique, dont 70 % sous forme particulaire (déchets et plancton). (WETZEL, 1975)

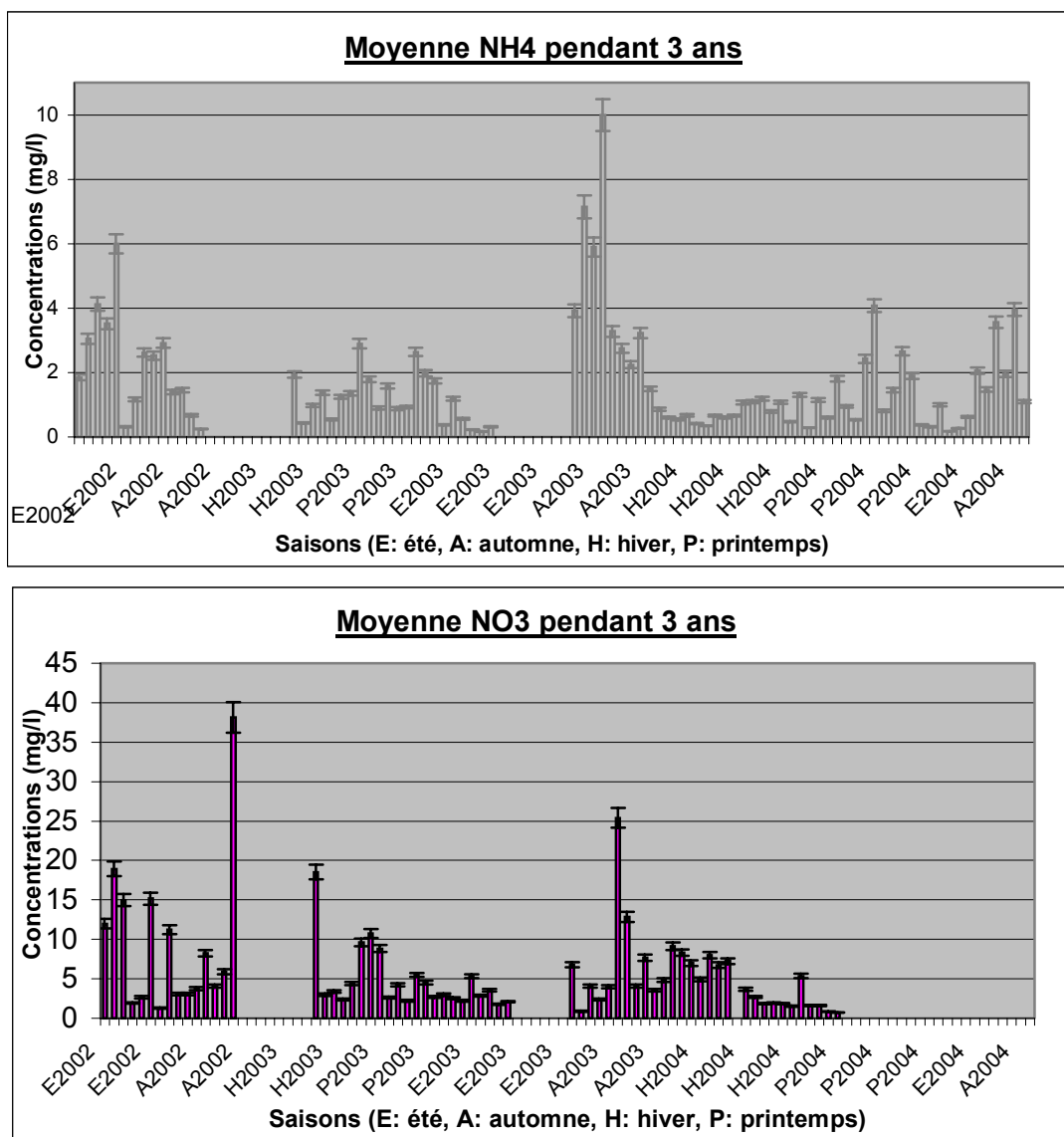
Ces particules tombent sur le fond et ne deviennent accessibles qu'après digestion par les microorganismes. En réalité, les orthophosphates qui constituent le phosphate accessible ne représente que 5 à 10 % du phosphore total. C'est la seule forme qui peut être déterminée directement et c'est celle qui fait l'objet de ces analyses.

Les excès en orthophosphates (forme minérale soluble directement assimilable par les végétaux) contribuent à l'eutrophisation des eaux. Ceci se traduit à Virelles par un développement excessif de phytoplancton. (MOUREAU & al., 1988)

Les concentrations en phosphate sont supérieures durant l'été. Ceci peut s'expliquer par le lessivage des sols agricoles lors des fortes pluies et orages d'été ainsi que par l'accumulation des effluents des bovins et des engrais. Les mois de juillet, août et septembre correspondent en partie aux périodes où il est autorisé d'épandre des fertilisants organiques tandis que la limite pour mettre des engrais sur les terres se situe en août.

On observe des variations cycliques des concentrations en **ammonium**. Le niveau de NH_4^+ est très faible durant l'hiver (< 1 mg/l) et augmente doucement pour atteindre les valeurs seuils à la fin de l'été (septembre-octobre). Les concentrations peuvent atteindre 10 mg/l.





Figures 8, 9 et 10: Evolution des concentrations en PO_4^{3-} , NH_4^+ et NO_3^- du 11 juillet 2002 au 3 novembre 2004 en fonction des saisons

Ces taux élevés s'expliquent par une accumulation du fumier ainsi que des engrais et le retour des bêtes en prairies. En effet, l'ammonium provient de la décomposition de matières protéiques par les bactéries ammonifiantes (débris animaux et végétaux, excréments animaux). Il est de ce fait considéré comme un indicateur d'activité bactérienne d'eaux contaminées par du matériel organique. L'ammonium aura donc tendance à s'accumuler en cas de déficience de la nitrification dans une eau mal oxygénée ou en cas d'excès de matières organiques (MOUREAU & al., 1985)

Les **nitrate**s sont moins visibles durant l'hiver. Ils sont principalement amenés par les engrais ou proviennent de l'activité bactérienne nitrifiante. Ils peuvent également être amenés au sol par les pluies d'orage.

La compétition végétale pour cet azote est importante: c'est un nutriment limitant pour les populations algales excepté pour les cyanophycées fixatrices d'azote atmosphériques. Elles se développent rapidement dès que les autres sont éliminées de la compétition. Ces dernières

forment alors des fleurs d'eau.

Selon les normes utilisées par le C.A.R.A.H. (Centre Agronomique de Recherches Appliquées de la province de Hainaut), nous pouvons considérer les stations 2, 3 et 4 comme non polluées (annexe 1). Le Ry Nicolas (station 1) ainsi que les ruisseaux 5 et 6 atteignent un degré de pollution à la limite des normes fixées. Les eaux de la rive ouest présentent de trop importantes teneurs en azote ammoniacal, nitrates et orthophosphates. Ceci indique une pollution dépassant le seuil critique.

En ce qui concerne l'étang, les échantillons d'eau montrent des teneurs en nitrates, phosphates et en oxygène dissous inférieur au seuil critique. Cependant, en cas de pollution momentanée, ces concentrations risquent de rapidement se retrouver au-delà du seuil critique et par la même occasion de mettre en péril les organismes présents.

1.2.4.2. Intérêt de la Charte pour l'étang de Virelles

Si l'ensemble des actions prévues dans la Charte est respecté -ou du moins la majeure partie-, on peut s'attendre à ne plus voir apparaître de fleurs d'eau sur l'étang d'ici quatre à cinq ans et par la suite ne plus observer de développement anarchique d'algues.

Le facteur de maîtrise est le phosphore. Une réduction à l'extrême de l'azote entraînerait une activité compensatrice des cyanobactéries fixatrices d'azote et une augmentation de la charge interne en phosphore. Par conséquent, les effets visibles des actions réalisées se marqueront lorsque l'étang pourra être classé comme plan d'eau mésotrophe.

1.3. Description du milieu naturel

1.3.1. La flore

1.3.1.1. Fonctions écologiques des macrophytes

Le terme de macrophyte désigne toutes les plantes aquatiques visibles à l'œil nu. Les parties utiles à la photosynthèse se trouvent, en période de floraison, sous l'eau ou en surface.

Les macrophytes ont un rôle important dans le fonctionnement naturel de l'étang, en particulier dans la zone littorale. Cette zone peu profonde, la plus riche en faune et flore aquatiques, constitue un système complexe dont l'équilibre est fragile.

Les macrophytes aquatiques sont essentiels à la vie d'un étang. Ils structurent l'habitat des poissons et des organismes de plus petite taille, les protègent des courants et des prédateurs, abritent leurs œufs et, comme producteurs primaires, constituent une importante source de nourriture. Ils jouent en outre un rôle essentiel dans le bilan en oxygène et en nutriments. Sans eux, les rives subiront l'effet dévastateur du courant entraînant l'érosion des sols et la disparition de la flore. Privées de l'ombre des arbres, les eaux se réchaufferaient et les poissons en souffriraient.

Ces végétaux sont également de bons indicateurs de la qualité du milieu aquatique. Ils sont particulièrement sensibles aux changements (à l'augmentation) des concentrations en substances nutritives (spécialement en phosphore et en ammonium) et aux pollutions organiques. L'étude de leurs peuplements permet donc de suivre les variations de pollution dans l'étang.

1.3.1.2. Séquences macrophytiques bioindicatrices des eaux douces

✧ Groupement oligotrophe stricte

Ce groupement est caractérisé par *Potamogeton coloratus* (Potamot coloré). Deux characées pionnières *Chara hispida* et *C. vulgaris*, sont, aussi présentes. De plus, *Juncus subnodulosus* (Jonc à tépales obtus) profite du CO₂ dissous avant épuisement photosynthétique. La forme submerse de *Berula erecta* (Petite berle) est constamment présente et parfois dominante. (CARBIENER & al., 1995)

✧ Groupement méso-oligothrophe

Ce groupement est pauvre en espèces. Son aspect est très typique, il est dominé par la forme submerse de *Berula erecta*. Cette espèce est ubiquiste dans les eaux claires oligosaprobies. Elle disparaît avec la pollution saprobe mais se maintient en milieu eutrophe. (CARBIENER & al., 1995)

✧ Groupement mésotrophe

Ce groupe est lui aussi pauvre en espèces, dominé par *Callitriche obtusangula* (Callitriche à angles obtus) qui reste souvent peu proliférant (moins de 50 % de recouvrement). *Berula erecta* se présente habituellement comme co-dominant. Aucune espèce n'est exclusive à ce groupement. Par contre, l'apparition d'espèces telles *Potamogeton friesii* (Potamot à feuilles mucronées), *Elodea canadensis* (Elodée du Canada), *Lemna trisulca* (Lentille à trois lobes), *Sparganium emersum* (Rubanier rameux) différencient ce groupe du précédent. *Hottonia palustris* (Hottonie des marais) et *Myriophyllum verticillatum* (Myriophylle verticillé) peuvent éventuellement s'y associer. (CARBIENER & al., 1995)

✧ Groupement méso-eutrophe

Cette association garde un aspect proche du groupe précédent mais présente une richesse spécifique plus importante. Aux espèces du groupement mésotrophe, se rajoutent *Potamogeton densus* (Potamot dense), *Zannichellia palustris* (Zanichellie des marais) ainsi que *Myriophyllum verticillatum*, *Potamogeton crispus* (Potamot crépu) et localement *Hottonia palustris* et *Hippuris vulgaris* (Pesse d'eau). Les rives sont typiquement colonisées par *Nasturtium officinale* (Cresson des fontaines). Un tapis de Lemnacées se développe avec, entre autre, *Lemna minuta* (Lentille d'eau minuscule), *Spirodela polyrrhiza* (Lentille d'eau à plusieurs racines) et *Azolla filiculoides* (Azolla commune). (CARBIENER & al., 1995)

✧ Groupement eutrophe

C'est dans ce groupe que le phosphore atteint son plafond limitant et que la diversité et la richesse spécifique deviennent maximales. Il caractérise des eaux encore limpides mais fortement enrichies en nutriments limitants (orthophosphate et azote ammoniacal). (BARROIN, 1990). *Callitriche obtusangula* et *Berula erecta* sont toujours présents. *Nasturtium officinale* n'est plus optimal et tend à être remplacé par *Rorippa amphibia* (Rorippe amphibie). Des espèces de milieux eutrophes comme *Potamogeton pectinatus* (Potamot pectiné), *P. perfoliatus* (Potamot perfolié), *Oenanthe fluviatilis* (Oenanthe des rivières) et *Ranunculus fluitans* (Renoncule flottante) apparaissent. De plus, *Myriophyllum spicatum* (Myriophylle en épi) tend à remplacer *M. verticillatum* et *Elodea nuttallii* (Elodée à feuilles étroites) supplante *E. canadensis*. (CARBIENER & al., 1995)

✧ Groupement hypereutrophe

La richesse spécifique baisse. Le groupement est caractérisé par *Ranunculus fluitans*, *Potamogeton perfoliatus* et *P. nodosus* (Potamot nouveaux) dans le faciès lotique et par *P. nodosus* et *Ceratophyllum demersum* (Cératophylle épineux) dans les faciès lenticles. De plus, *Potamogeton pectinatus*, *Myriophyllum spicatum* et *Sparganium emersum* sont encore très abondants, car ces espèces sont polluo-tolérantes. En revanche, *Potamogeton densus*, *Zannichellia palustris* et *Lemna triscula* disparaissent. (CARBIENER & al., 1995)

1.3.1.3. La végétation aquatique de l'étang de Virelles

L'étang de Virelles a été étudié par SYMOENS en 1957 dans le cadre de son travail consacré à la végétation algale de la Haute-Belgique. Il caractérise les eaux du type famennien (légèrement basique et moyennement minéralisées). En 1966, MOMMAERTS a confirmé les résultats et conclusions obtenues par Symoens. Il ajoute que la faible profondeur de l'eau, sa richesse en éléments nutritifs et son alcalinité laissent prévoir le caractère eutrophe de ce milieu aquatique. Enfin, au cours de ces dernières années, DARTEVELLE-MOUREAU et VERHAEGEN (1981) ont également étudié cet étang.

La végétation aquatique de l'étang de Virelles a été anéantie à la suite d'un épandage massif d'herbicide en 1974.

La vidange de l'étang en 1986-1987 avec exportation des poissons (brèmes et carpes en majorité âgées), suivie de la remise en eau, a provoqué la clarification de l'eau et la réapparition d'une flore très intéressante à base de *Zannichellia palustris*, *Potamogeton pectinatus*, *P. natans*, *P. lucens*, *P. crispus*, *Myriophyllum spicatum*, *Ranunculus aquatilis*, ...

De plus, les berges laissées libres par les roselières sont colonisées par *Polygonum amphibium* (Renouée amphibie), *Sagittaria sagittifolia* (Sagittaire), *Sparganium erectum* (Rubanier simple) et de nombreuses pousses de *Alisma plantago-aquatica* (Plantain d'eau commun) (SCOHY, 1991).

Des algues telles *Rhizoclonium hieroglyphicum* ont également fait une apparition massive à cette époque, puis sont tombées au fond de l'étang. Mais en 1989 déjà, cette végétation régressait probablement suite au broutage par les poissons. Il s'ensuit une forte diminution de certaines populations d'oiseaux. Une nouvelle vidange de l'étang a eu lieu en automne 1989 provoquant à nouveau l'expansion des plantes aquatiques. Depuis lors, une vidange de l'étang est réalisée tout les 3 ou 4 ans.

1.3.1.3.1. Evolution de la flore macrophytique entre 1989 et 2002

En 1989 plusieurs signes de dégradation se manifestent: l'eau a perdu peu à peu sa limpidité et les herbiers aquatiques subissent une régression générale. *Potamogeton pectinatus* et *Zannichellia palustris* ne recouvrent plus que la partie ouest de l'étang. Les eaux troubles sont chargées d'algues.

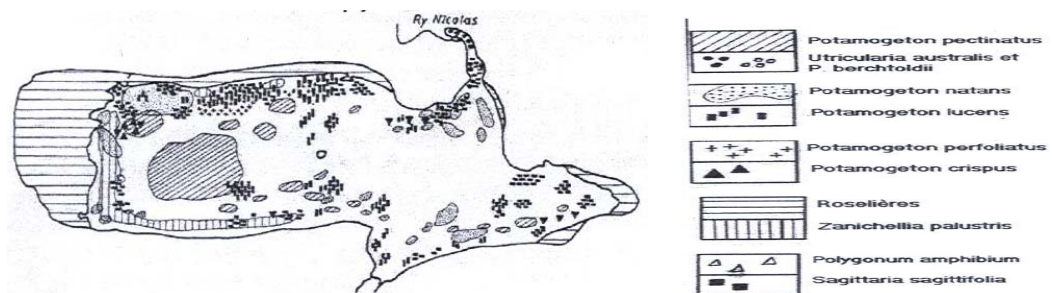


Figure 11: Carte de la répartition des macrophytes de l'étang de Virelles en 1989

Au **printemps 1990**, on constate une nette dominance des potamots à fines feuilles: le *Potamogeton pectinatus*, *Zannichellia palustris* et surtout *Potamogeton berchtoldii* se développent dans les endroits calmes et peu profonds de l'étang. Par contre, les potamots à feuilles larges montrent une réduction généralisée.

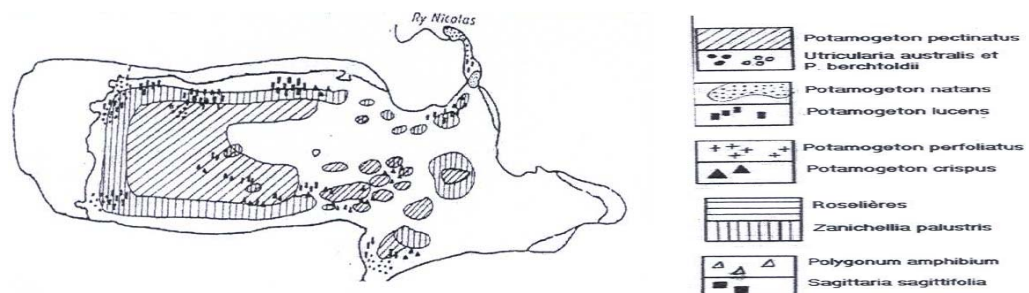


Figure 12: Carte de la répartition des macrophytes de l'étang de Virelles en 1990

En **1991**, les espèces dominantes se maintiennent mais ne s'étendent pas. Les herbiers de *Potamogeton pectinatus* se fractionnent en différentes plages. Seuls quelques îlots de potamots à feuilles larges subsistent dans la zone nord-ouest. Les feuilles de *Nymphaea alba* (Nénuphar blanc) disparaissent peu de temps après leur apparition.

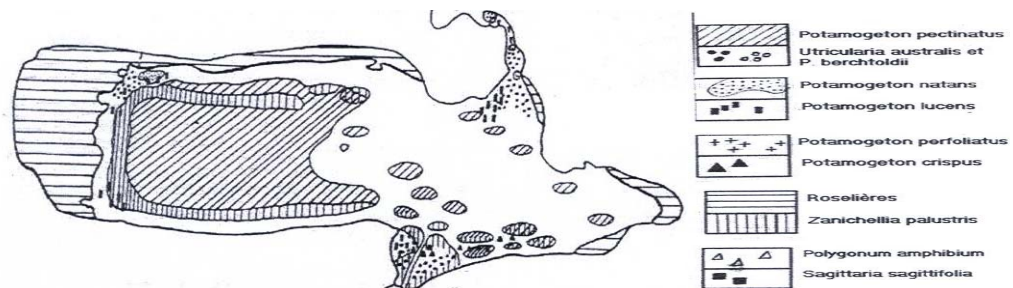


Figure 13: Carte de la répartition des macrophytes de l'étang de Virelles en 1991

En **1992**, on observe peu de nouveautés par rapport à 1991. Néanmoins, un tapis d'algues vertes filamenteuses recouvre les herbiers de potamots.

A partir du 15 mars **1993**, les eaux sont transparentes et les potamots se développent aux alentours du 10 mai. *Potamogeton pectinatus* est toujours l'espèce dominante au centre de l'étang tandis que *Zannichellia paulustris* disparaît partout, excepté dans le Ry Nicolas.

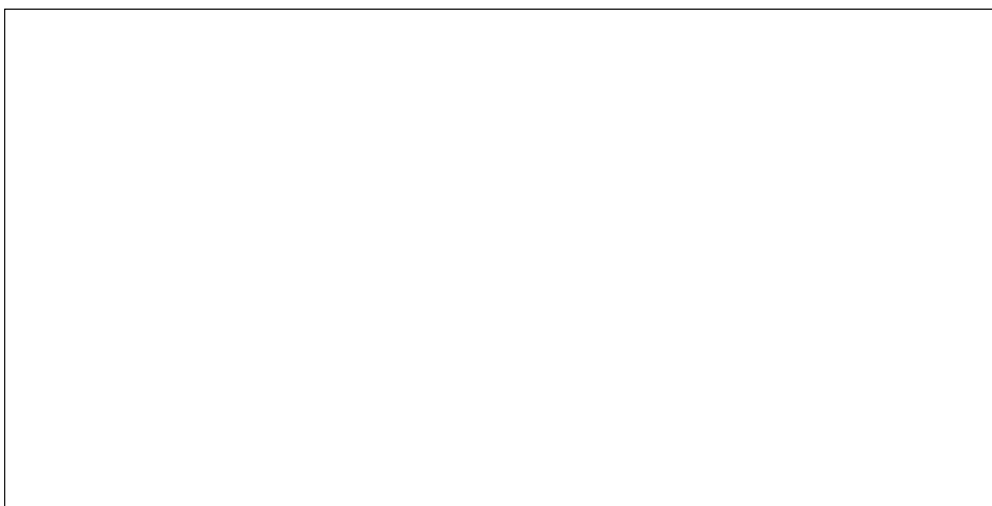


Figure 14: Evolution du développement en algues, potamots à larges feuilles et potamots à fines feuilles en fonction de la limpidité de l'eau de 1989 à 1997.

En **1994**, on constate une progression constante de *Potamogeton berchtoldii* particulièrement dans la zone est de l'étang, au voisinage des roselières nord et ouest, ainsi qu'au niveau du déversoir.

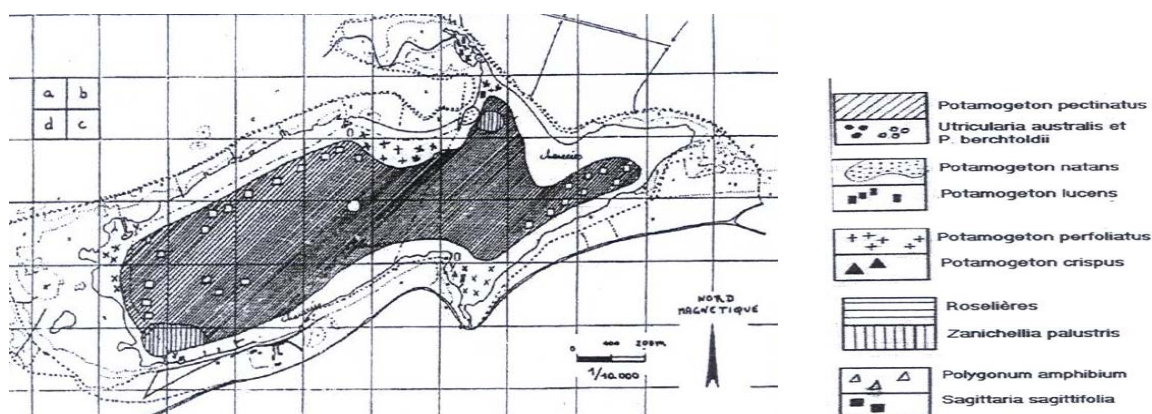


Figure 15: Carte de la répartition des macrophytes de l'étang de Virelles en 1994

Durant l'année **1995**, les *Potamogeton pectinatus* et *P. berchtoldii* restent les principales espèces peuplant le milieu du plan d'eau. Les characées sont présentes tout le long de la rive nord. Des algues vertes et bleues se manifestent et entraînent la disparition des potamots et l'apparition des eaux vertes.

En **1996**, la végétation aquatique n'a pas fait l'objet de suivis comme les années précédentes. Une nouvelle espèce a cependant été découverte: l'*Hydrocharis morsus-ranae* (Petit nénuphar).

En **1997**, les potamots à feuilles fines dominent largement dans toute la partie centrale du plan d'eau. *Potamogeton pectinatus* est accompagné par endroit par *Potamogeton berchtoldii*. Les herbiers de potamots à feuilles fines s'étendent maintenant jusqu'au chenal du Ry Nicolas mais leur densité diminue au-delà de l'île. Les herbiers se développent ensuite de l'autre côté du chenal et occupent la majeure partie de l'anse de l'étang.

Durant les années **1998, 1999 et 2000**, la végétation aquatique n'a pas été étudiée.

En **2002**, les potamots à feuilles fines tel *Potamogeton pectinatus* restent les plus abondants dans la partie centrale de l'étang. Cet herbier s'étend jusqu'au chenal du Ry Nicolas. Les potamots à larges feuilles se tiennent toujours dans l'embouchure du Ry Nicolas. *Equisetum fluviatile* et *Alisma plantago-aquatica* y sont également bien implantés.

Dans la partie est, près de l'affût du déversoir, *Polygonum amphibium* et *Nuphar lutea* (Nénuphar jaune) ont été remarqués. *Nymphaea alba*, quant à lui, a été observé dans la partie nord-ouest du plan d'eau. En outre, *Hydrocharis morus-ranae* a de nouveau été localisé dans les chenaux de la roselière.

1.3.1.3.2. Evolution du peuplement algal

Le phytoplancton est présent toute l'année dans le plan d'eau. La meilleure saison d'observation se déroule de mai à octobre. En effet, les basses températures hivernales diminuent les divisions cellulaires et donc les conséquences visibles du phénomène d'eutrophisation sont réduites.

Mois	Taxa prédominants	Nombre de taxa
Mai	Euglenophyceae + Chlorophyceae	26
Juin	Chlorophyceae + Bacillariophyceae	61
Juillet	Euglenophyceae + Bacillariophyceae	50
Août	Euglenophyceae + Chlorophyceae	95
Septembre	Euglenophyceae + Chlorophyceae	67
Octobre	Euglenophyceae + Chlorophyceae	50

Tableau 3: Succession, de mai à octobre, des différents taxons algaux présents dans l'étang de Virelles (MOUREAU, 1983)

Pour définir l'appartenance d'un milieu à une classe trophique déterminée, Thunmark (1945) utilise le rapport Chlorococcales/Desmidiaceae. Dans une série d'exemples tirés des lacs du sud de la Suède on voit qu'en été ce rapport peut varier:

de 2,0 à 14,0 pour les lacs très eutrophes
de 1,0 à 3,0 pour les lacs faiblement eutrophes

	1982				1983							
Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août
Chlorophyceae	27	24	21	8	3	3	6	2	10	17	25	42
Desmidiaceae	3	2	2	2	0	0	2	0	2	3	4	3
INDICE	9	12	10,5	4	3	3	3	2	5	5,6	6,1	14

Tableau 4 : Nombre de Chlorophyceae et de Desmidiaceae présents à Virelles en 1982 et 1983 et l'indice de Thunmark qui en découle

Ces résultats confirment l'importance du phénomène d'eutrophisation au cœur de l'étang de Virelles. En effet, ils montrent que l'étang est faiblement eutrophe de janvier à avril et très eutrophe les autres mois. Le mois d'août présente un pic de 14. (MOUREAU, 1983)

1.3.2. La faune

La faune du site est aussi connue que variée. Ainsi, en ce qui concerne les oiseaux, 227 espèces sont présentes dont 174 de façon régulière. Parmi celles-ci 83 espèces nichent sur le site. On notera la présence des oiseaux repris dans le tableau 3 et qui sont cités dans l'Annexe I de la Directive 79/409/CEE concernant la conservation des oiseaux sauvages.

Le tableau 4 reprend les autres espèces d'animaux présents à Virelles et bénéficiant d'un statut de protection particulier.

Nom latin	Nom français	Statut sur le site
<i>Gavia stellata</i>	Plongeon catmarin	VO
<i>Gavia artica</i>	Plongeon artique	VO
<i>Botaurus stellaris</i>	Grand butor	n/MP
<i>Ixobrychus minutus</i>	blongios nain	n/VO
<i>Egretta gazetta</i>	Aigrette garzette	VO
<i>Egretta alba</i>	Grande aigrette	P
<i>Ardea purpurea</i>	Héron pourpré	P
<i>Ciconia nigra</i>	Cigogne noire	P
<i>Ciconia ciconia</i>	Cigogne blanche	P/E
<i>Platalea leucorodia</i>	Spatule blanche	VO
<i>Cygnus bewickii</i>	Cygne de Bewick	P
<i>Cygnus cygnus</i>	Cygne chanteur	P/H
<i>Mergus albellus</i>	Harle piette	P/H
<i>Pernis apivorus</i>	Bondrée apivore	N/E
<i>Circus aeruginosus</i>	Busard des roseaux	n/MP
<i>Circus cyaneus</i>	Busard Saint-Martin	P/H
<i>Circus pygargus</i>	Busard cendré	VO
<i>Pandion haliaetus</i>	Balbusard pêcheur	P/E
<i>Milvus migrans</i>	Milan noir	nP/E
<i>Milvus milvus</i>	Milan royal	P/E
<i>Falco columbiarius</i>	Faucon émerillon	P/H
<i>Falco peregrinus</i>	Faucon pèlerin	VO
<i>Porzana porzana</i>	Marouette ponctuée	n/P
<i>Recurvirostra avosetta</i>	Avocette élégante	P/E
<i>Pluvialis apricaria</i>	Pluvier doré	P
<i>Philomachus pugnax</i>	Combattant varié	P/E
<i>Tringa glareola</i>	Chevalier sylvain	VO
<i>Larus melanocephalus</i>	Mouette mélanocéphale	VO
<i>Sterna hirundo</i>	Sterne pierregarin	P/E
<i>Sterna albifrons</i>	Sterne naine	VO
<i>Chlidonias niger</i>	Guifette noire	P/E
<i>Dendrocopos medius</i>	Pic mar	N/S
<i>Dryocopus martius</i>	Pic noir	N/S
<i>Alcedo atthis</i>	Martin pêcheur d'Europe	n/MP

N: nicheur
n: nicheur disparu ou susceptible de se réinstaller
MP: migrateur partiel, présent toute l'année
S: sédentaire, présent toute l'année
P: visiteur de passage
H: visiteur d'hiver (d'octobre à avril)
E: visiteur d'été (d'avril à octobre)
VO: visiteur occasionnel

Tableau 5 Liste des espèces d'oiseaux trouvés dans la réserve naturelle de l'étang de Virelles et faisant l'objet d'un statut de protection particulier (Annexe 1 de la Directive 79/409/CEE)

Nom latin	Nom français
Odonates	
<i>Brachytron pratense</i>	Aesche printanière
<i>Gomphus vugatissimus</i>	Gomphus très commun
<i>Somatochlora flavomaculata</i>	Cordulie à taches jaunes
<i>Epitheca bimaculata</i>	Cordulie à deux taches
<i>Leucorrhinia dubia</i>	Leucorrhine douteuse
Amphibiens	
<i>Rana kl. Esculenta</i>	Grenouille verte
<i>Triturus alpestris</i>	Triton alpestre
<i>Triturus helveticus</i>	Triton palmé
<i>Triturus vulgaris</i>	Triton vulgaire
Mammifères	
<i>Castor fiber</i>	Castor d'Europe
<i>Myotis mystacinus</i>	Vespertilion à moustaches
<i>Myotis daubentoni</i>	Vespertilion de Daubenton
<i>Nyctalus noctula</i>	Noctule commune
<i>Pipistrellus pipistrellus</i>	Pipistrelle

Tableau 6: Liste des animaux présents dans la réserve naturelle de l'étang de Virelles bénéficiant d'un statut de protection particulier

2. Matériel et méthodes

2.1. Analyses de l'eau

2.1.1. Terrain

2.1.1.1. Prélèvements d'eau

Chaque semaine, 2 piluliers de 40 ml ont été remplis d'eau provenant de 15 points localisés autour de l'étang. Le premier contient de l'eau brute qui permet d'analyser le phosphore total. Le second est rempli d'eau filtrée sur des filtres en microfibres de verre GF/3 qui permet de déterminer les concentrations en nitrates, ammonium et orthophosphates. Tous ces échantillons sont conservés au frais (4°C) si les analyses ont lieu endéans les 24 h ou sont congelés si elles se déroulent dans un laps de temps plus important.

De plus, 2 litres d'eau brute ont été récoltés en 2 points de l'étang (déversoir = "lagune" et ponton = "centre étang"). Cette eau est conservée au frais et filtrée au laboratoire à l'aide d'une pompe à vide afin de quantifier la chlorophylle *a* active.

2.1.1.2. Les sédiments: détermination de la matière organique par la méthode de perte au feu (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2003)

La teneur en matière organique joue un rôle important dans la fertilité du sol. Elle amplifie grandement la capacité d'échange cationique du sol et retient les nutriments assimilables par les végétaux. La matière organique est donc un réservoir de nutriments lentement assimilables.

La perte au feu permet de mesurer directement la matière organique dans le sol. On place les échantillons pendant 24 heures dans un four à 375 °C. La perte de poids, après calcination, donne la quantité de matière organique présente dans l'échantillon.

Il faut éviter les températures plus élevées car les carbonates présents dans le sol se fractionnent, augmentant la teneur en matière organique. Le préséchage à 150 °C réduit la variabilité du test en éliminant l'eau emprisonnée dans les feuillets de sols.

Les résultats de l'échantillon sont calculés à partir de cette équation:

$$\% \text{ M.O.} = [((M_1 - M_0) - (M_2 - M_0)) / (M_1 - M_0)] \times 100$$

M.O. = matière organique

M₀ = masse de la coupelle (g)

M₁ = masse finale (g)

M₂ = masse de la coupelle contenant les cendres (g)

2.1.2. Laboratoire

2.1.2.1. Les nutriments

Les échantillons d'eau sont filtrés pour doser les principaux nutriments dissous et le phosphore total. Ces analyses sont effectuées par des méthodes colorimétriques.

- **Nitrates** (mg NO₃⁻/l)

L'acide sulfosalicylique forme avec les nitrates, en milieu anhydre, un complexe qui libère en milieu basique l'ion nitrosalicylate, de couleur jaune, qui permet un dosage colorimétrique des ions NO₃⁻. L'absorbance est mesurée au spectrophotomètre à 420 nm.

- **Ammonium** (mg NH₄⁺/l)

Les ions ammonium réagissent avec les ions hypochlorites, issus de l'hydrolyse alcaline du dichloroisocyanurate, et avec le salicylate de sodium (pH 12,6) en présence de nitroprussiate de sodium, qui agit comme catalyseur, pour former un composé coloré. La coloration est bleue mais apparaît verte suite à la couleur jaune du réactif. L'absorbance est mesurée au spectrophotomètre à 655 nm.

- **Orthophosphates** (mg PO₄⁻⁻⁻/l)

A partir d'un échantillon d'eau filtrée on va déterminer la quantité d'orthophosphates. En réalité, les orthophosphates constituent le phosphate accessible. Ils représentent 5 à 10 % du phosphore total. Ces SRP (Soluble Reactive Phosphor) réagissent avec une solution de molybdate d'ammonium et de tartrate d'antimoine de potassium pour donner un composé qui, réduit par l'acide ascorbique, forme un complexe bleu. L'absorbance est mesurée au spectrophotomètre à 885 nm. Cette étape est similaire pour le dosage du phosphore total.

- **Phosphore total** (mg PO₄⁻⁻⁻/l)

La concentration en phosphore total a été déterminée à partir d'un échantillon d'eau brute. Le dosage est semblable à celui des SRP mais nécessite, au préalable, une digestion à chaud

par l'ajout d'un mélange de persulfate de potassium, d'hydroxyde de sodium et d'acide borique. Cette étape a pour objectif d'oxyder le phosphore et ensuite de l'hydrolyser en orthophosphates. L'absorbance est mesurée au spectrophotomètre à 885 nm.

Chaque concentration est par la suite transformée en mg P/l ou en mg N/l afin de mieux illustrer les concentrations présentes dans les eaux de l'étang de Virelles et de ses affluents.

2.1.2.2. La chlorophylle *a* et HPLC

- **La chlorophylle *a*** (Pechar, 1987)

La méthode de Pechar a été légèrement modifiée: l'extraction a été réalisée grâce à une sonication à froid plutôt qu'à chaud.

La mesure de la chlorophylle *a* permet de réaliser une estimation de la biomasse phytoplanctonique. Le phytoplancton est recueilli par filtration d'un volume d'eau connu sur des filtres en fibre de verre GF/C de 47 nm.

Les filtres contenant les pigments sont rangés dans des fioles auxquelles sont ajoutés 8 ml d'acétone 90 %. L'acétone est mélangé à du méthanol. L'acétone permet une meilleure stabilité des pigments tandis que le méthanol permet une extraction plus efficace. Ces fioles sont ensuite placées sur de la glace pilée dans un bain à ultrasons, afin d'extraire les pigments (sonication de 15 minutes).

L'absorbance est ensuite mesurée au spectrophotomètre à 665 nm avant et après acidification de l'échantillon. Cette acidification permet la transformation des pigments chlorophylliens actifs en phéopigments. Cette méthode permet de supprimer l'erreur de la première mesure due à la présence des pigments chlorophylliens dégradés inactifs absorbant toujours à 665 nm.

La concentration en chlorophylle *a* active est calculée d'après l'équation générale basée sur la diminution d'absorbance de l'extrait acidifié:

$$\text{Chl } a \text{ } (\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}) = (\text{Db} - \text{Da}) \cdot 28,92 \cdot v / (V \cdot l)$$

Avec Db : densité optique de l'extrait à 665 nm avant acidification

Da : optique de l'extrait à 665 nm après acidification

v : volume de solvant utilisé pour l'extraction en ml

V : volume d'eau filtré en litre

l : longueur du parcours optique en cm

- **HPLC** (High Performance Liquid Chromatography)

Suite aux mesures de chlorophylle *a*, l'HPLC a été utilisée afin de déterminer de façon plus précise la biomasse algale ainsi que la composition phytoplanctonique. Cette détermination a été faite après extraction à l'acétone 90 %. Le système HPLC utilisé comprend un *Waters multisolvent delivery system*, un injecteur automatique *Waters* et deux détecteurs: un détecteur à barrettes de diodes *Waters 996* et un fluorimètre *Waters 470* (réglé pour la détection optimale des chlorophylles et dérivés). La séparation des pigments est

obtenue par un gradient ternaire. La colonne de chromatographie est une colonne de type Waters Nova-Pak C18 de 25 cm de long.

De façon standard, le volume d'injection est de 50 µl. La calibration est effectuée sur base de droites de calibration comportant de 3 à 4 points obtenus par injection de volumes croissants de solutions standards. Celles-ci sont en fait des pigments (chlorophylles et caroténoïdes) purifiés ou de concentration connue.

L'intégration des résultats est réalisée grâce au logiciel Millennium 2, sur des chromatogrammes extraits à une longueur d'onde de 436 nm. L'identification des pigments présents dans les échantillons se fait à la fois via leur temps de rétention et via la correspondance de leur spectre d'absorption à 436 nm avec ceux de pigments connus stockés dans une librairie de spectres. Les concentrations des différents pigments s'expriment en µg/l.

La conversion en biomasse est réalisée à l'aide du logiciel *CHEMTAX* (MACKEY & al., 1996). Celui-ci utilise les pigments marqueurs des classes d'algues présentes au sein du plancton afin de quantifier leurs biomasses respectives.

2.2. Etude des macrophytes

Mon étude concerne la végétation perceptible en surface telles les espèces émergentes ou flottantes, l'évaluation se réalise à partir d'un canoë.

2.2.1. Terrain

Les plantes destinées à être conservées dans l'herbier sont récoltées avec soin. Les échantillons sont, si possible, prélevés entiers (organes aériens et souterrains). Les plantes cueillies sont conservées quelques heures dans un sac en plastique, cependant, il est préférable de les placer directement dans du papier absorbant (journaux) et ensuite de les presser, par exemple, entre des livres.

Au moment de la cueillette, la date et le lieu précis de la récolte doivent être indiqués. De plus, des renseignements concernant la station dans laquelle la plante croissait sont ajoutés. On peut éventuellement noter certaines caractéristiques qui pourraient disparaître une fois la plante sèche (odeur, couleur,...).

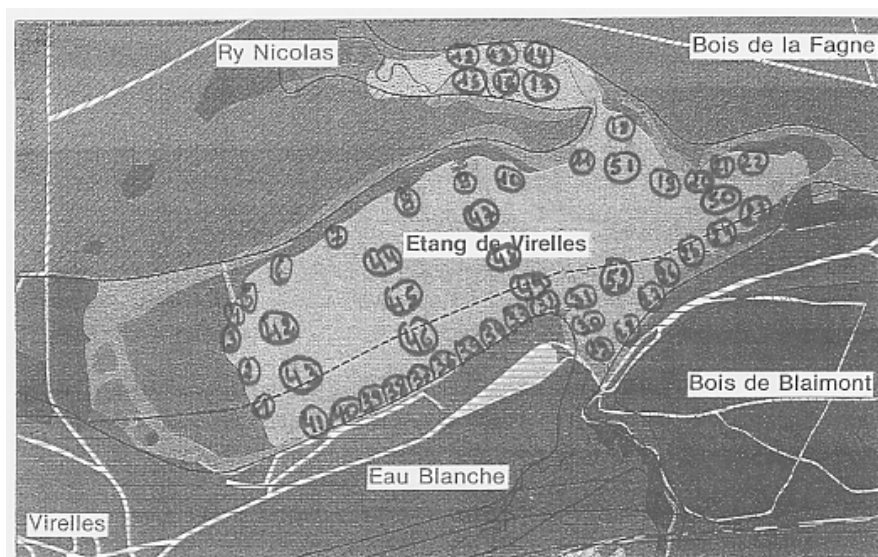


Figure 16: Carte des lieux d'échantillonnage des macrophytes sur l'étang de Virelles

Le Ry Nicolas

Le Ry Nicolas est étudié de façon très minutieuse. Cet affluent principal de l'étang de Virelles montre une importante biodiversité. Pour cette raison, chaque portion a fait l'objet d'une attention particulière afin d'identifier toutes les espèces colonisant cet endroit.

Une liste des espèces est un outil important pour observer l'évolution des communautés dans le temps. Elle permet d'illustrer les changements de productivité dans cet étang.

Equipement requis

- ♦ Un bateau capable de manœuvrer où il y a peu d'eau
- ♦ Des sacs en plastiques pour contenir les plantes non identifiées
- ♦ Une carte du plan d'eau et des feuilles pour prendre note
- ♦ Un système GPS
- ♦ Un herbier pour conserver les végétaux

Méthode

L'inventaire est réalisé par des mouvements lents à travers la zone littorale à la recherche de plantes submergées et, le long de la berge, pour trouver les espèces émergentes.

Les plantes doivent être déterminées aussi précisément que possible. De plus, leur localisation et les coordonnées déterminées par GPS (Global Positioning System) sont marquées sur le plan.

L'étang de Virelles

La quantification d'une population peut se faire selon deux approches:

- ✿ par des points de prélèvement fixés le long des berges
- ✿ par des points de prélèvement dans l'étang

Les points de prélèvement sont identiques à ceux utilisés lors d'études antérieures. Cette approche permet la mise en évidence d'une évolution des macrophytes. Dans cette partie du travail, un quadrat de 1 m² est utilisé. Il est déplacé de façon à couvrir une superficie de 2 m² parallèle à la berge.

Les points de prélèvement dans l'étang (potamots) se situent le long de transects examinés en 2004 mais aussi le long des berges. Les zones à échantillonner présentent peu de variations. Pour cette raison, des surfaces de 4 m² sont examinées.

a) Méthode des points de prélèvement

Equipement requis

- ◆ Des cartes détaillées du plan d'eau
- ◆ Un GPS
- ◆ Une carte avec les points à échantillonner présélectionnés et leurs coordonnées
- ◆ Un bateau capable de naviguer où il y a peu d'eau
- ◆ Des tableaux de données pour y inscrire les espèces observées en fonction des points d'échantillonnage
- ◆ Un quadrat de 1 m²

Méthode

Cette technique utilise des points de prélèvement choisis de façon à être représentative. Dans cette approche, l'étude se base sur des endroits ayant préalablement fait l'objet d'une attention particulière. Le nombre d'endroits à échantillonner est fonction de la taille de la zone littorale. Pour accroître la puissance statistique, il est préférable d'utiliser un maximum de lieux.

De plus, un examen approfondi a été réalisé dans les zones où le public a accès. En effet, c'est à cet endroit qu'apparaissent en premier les espèces invasives.

Il est important d'utiliser le même protocole d'échantillonnage pour chaque point. La récolte de bons spécimens sert pour une identification ultérieure ou pour une confirmation par des taxonomistes. De plus, ces échantillons serviront de référence lors de nouvelles récoltes.

b) Méthode des lignes de prélèvement

Equipement requis

- ◆ Les lignes déterminées à l'avance
- ◆ Un GPS
- ◆ Une carte avec les points à échantillonner présélectionnés et leurs coordonnées
- ◆ Un bateau capable de naviguer où il y a peu d'eau
- ◆ Un quadrat de 1m²

- ◆ Des tableaux de données pour y inscrire les espèces observées en fonction des intervalles d'échantillonnage

Méthode

Cette méthode utilise les données récoltées le long des lignes préalablement établies et perpendiculaires à la rive. Des notes et/ou les coordonnées des plantes récoltées doivent être soigneusement prises. Chaque point situé le long de ces axes imaginaires est sujet à des récoltes. Cette approche utilise un quadrat de 1 m² déplacé à 4 reprises.

2.2.2. Laboratoire

Détermination à l'aide de clefs de détermination

Une première détermination est réalisée sur le terrain grâce à la clef réalisée aux Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix par Delvaux C. et par les fiches que j'ai conçues (annexe 11).

Par la suite, les déterminations ont été confirmées avec l'aide d'ouvrages comme par exemple le **Guide des fleurs sauvages** ou **la Nouvelle flore de Belgique, du Grand-Duché du Luxembourg, du Nord de la France et des régions voisines**.

Pour être certaine de l'identification des espèces trouvées, Monsieur Bouxin G., botaniste de formation, a vérifié mon herbier.

Compléter mon herbier réalisé avec des échantillons de l'été 2004

Une fois les plantes identifiées, elles ont été séchées, puis collées sur du papier à dessin à grains de 297 x 420 mm.

Chaque feuille comprend un seul échantillon. L'étiquette définitive est collée dans le coin inférieur droit de la feuille de l'herbier. Elle indique le nom latin, le nom français, la famille, le lieu de récolte, la date de récolte et le nom du déterminateur.

L'herbier est conservé dans un endroit sec à l'abri des fortes variations de température.

Carte de la répartition (espèce du centre de l'étang) sur base d'un quadrillage préalablement déterminé

Equipement requis

- ◆ Des cartes détaillées du plan d'eau avec le quadrillage
- ◆ Un GPS
- ◆ Un bateau capable de naviguer où il y a peu d'eau

Méthode

L'organisation des prélèvements peut fortement influencer les résultats. Idéalement la période d'échantillonnage correspond au moment où les plantes atteignent leur pic de biomasse, c'est-à-dire de mai à juillet.

Toute la végétation doit être cartographiée. Les espèces dominant largement sont indiquées sur la carte. Les autres régions sont cartographiées comme zones de transitions. De plus, d'éventuelles remarques concernant les espèces rares peuvent être prises. Le GPS est utilisé pour marquer les limites.

Liste des différentes espèces présentes avec localisation et coefficient d'abondance-dominance légèrement modifié

L'évaluation de l'abondance des espèces présentes est réalisée pour chaque point de prélèvement (coefficient d'abondance-dominance). L'estimation de l'abondance-dominance des différentes espèces peut, par exemple, se faire à l'aide de la méthode de Braun-Blanquet.

- 4 = 75 à 100 % (végétation quasi homogène)
- 3 = 50 à 75 % (une espèce domine mais présence d'autres espèces)
- 2 = 25 à 50% (espèce présente mais non dominante)
- 1 = 1 à 25% (espèce -très- peu présente)
- 0 = 0 % (espèce absente)

d0	27 et 28 juin	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8
1	Agrostis stolonifère	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Angélique vraie	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Baldingère	0	0	0	1	0	1	0	1
4	Barbarée commune	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Benoîte commune	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Callitriche à crochet	0	0	0	0	0	0	2	0
7	Cardamine amère	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Epiaire des marais	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Epilobe des marais	0	0	0	0	0	0	0	0
10	Epilobe des montagnes	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Epilobe hérissé	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Eupatoire chanvrine	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Fétuque arundinacée	0	0	0	0	0	0	0	0
14	Fétuque géante	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 7 : Partie d'une feuille de terrain comprenant les différentes espèces et leur coefficient d'abondance-dominance en fonction des sites de prélèvement

Application de l'analyse non symétrique des correspondances sur les résultats obtenus lors des campagnes de prospection

Par la suite, l'Analyse Non Symétrique des Correspondances a été appliquée aux résultats obtenus sur le terrain. Cette technique permet de passer du cahier de terrain à un tableau floristique.

L'analyse non symétrique des correspondances (NSCA) se base sur la façon dont les données sont récoltées sur le terrain. Les occurrences des espèces sont observées parmi des relevés.

Les relevés (nombre et position) sont choisis par l'observateur, pas les espèces. Il en résulte une dissymétrie fondamentale qui est explorée par NSCA. La différence entre CA (Analyse des Correspondances) et NSCA concerne précisément la métrique. Les espèces ont un poids uniforme égal à l'unité dans NSCA alors que CA est basée sur la métrique X^2 qui implique un double "averaging" calculé à partir des totaux marginaux des lignes et colonnes des tableaux. Dans NSCA, une forte importance est accordée aux espèces abondantes et

l'effet des espèces rares est fortement limité. Dans un tableau d'occurrences, un grand nombre de taxons rares ne sera donc pas un facteur limitant. Un poids très faible ramène automatiquement un taxon vers l'origine.(BOUXIN, 2005)

Réalisation d'une classification hiérarchisée divisive grâce à la technique de Bethet avec réallocations

Ensuite, les sites ont été soumis à une classification hiérarchique divisive. Ceci a pour but de grouper les sites présentant des groupements végétaux semblables.

La classification des relevés de végétation est donc l'arrangement de relevés en classes, à l'intérieur desquelles les membres ont en commun un certain nombre de caractéristiques les écartant des membres des autres classes.

Dans une **classification divisive**, c'est l'ensemble des relevés qui est divisé en sous-ensembles qui sont eux-même divisés et ainsi de suite jusqu'aux classes ultimes. Cette classification est généralement considérée comme avantageuse car elle est plus rapide et moins sensible à des variations locales qui sont susceptibles de créer des mauvaises combinaisons de relevés unitaires qui subsistent dans les étapes ultérieures de la classification agrégative.(BOUXIN, 2005)

3. Résultats et discussion

3.1. Résultats

3.1.1. Les analyses d'eau

3.1.1.1. Les nutriments

3.1.1.1.1. Situation générale

Les analyses ont été réalisées chaque semaine depuis le 14 février 2005 jusqu'au 27 juin 2005. J'ai choisi d'examiner plus précisément le 14 mars et le 17 mai. La première date illustre les résultats hivernaux et la seconde les résultats printaniers. L'été n'est pas caractérisé car la plupart des affluents étaient à sec durant la période des analyses.

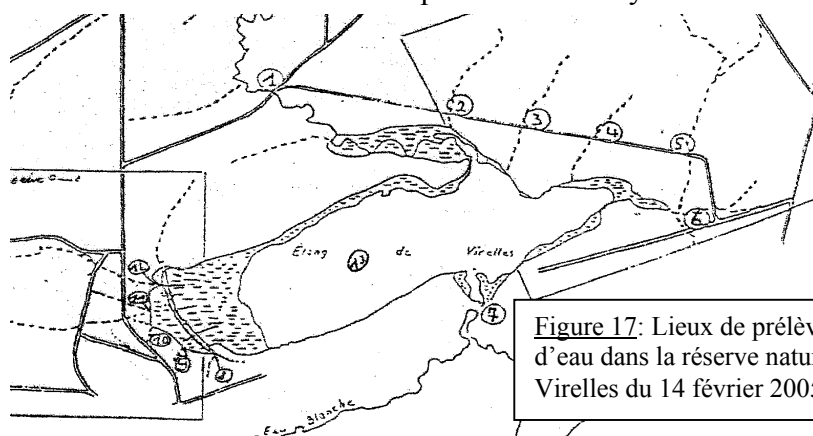
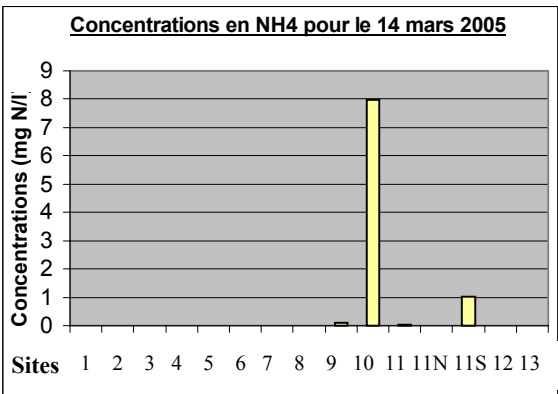
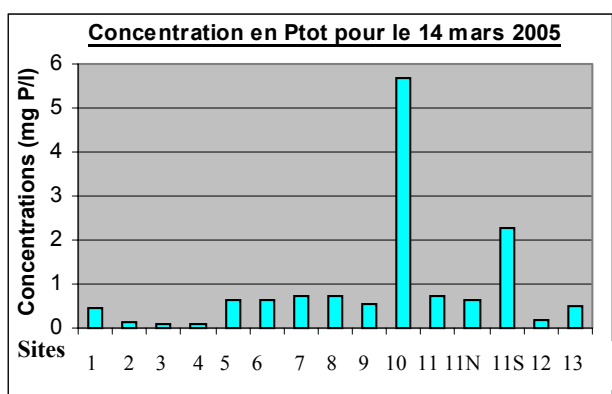
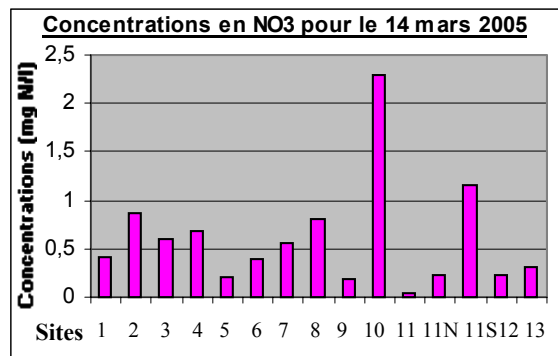
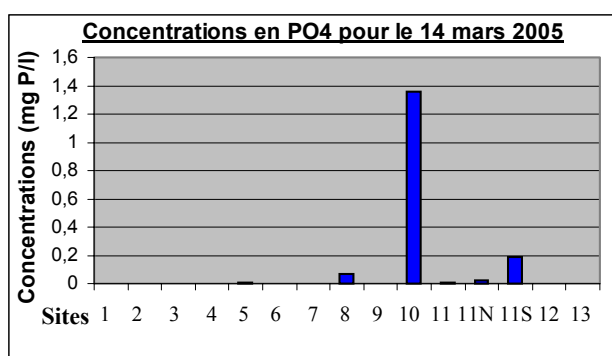


Figure 17: Lieux de prélèvement des échantillons d'eau dans la réserve naturelle de l'étang de Virelles du 14 février 2005 au 27 juin 2005

Le 14 mars 2005



Figures 18, 19, 20, 21: Evolution des concentrations en PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_3^- et Ptot pour les affluents de l'étang de Virelles le 14 mars 2005

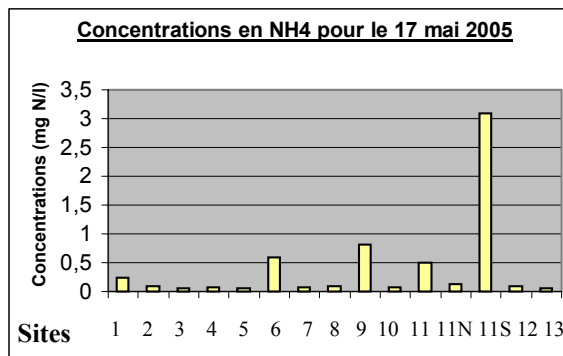
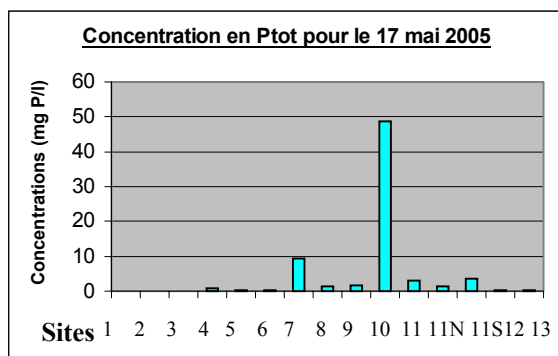
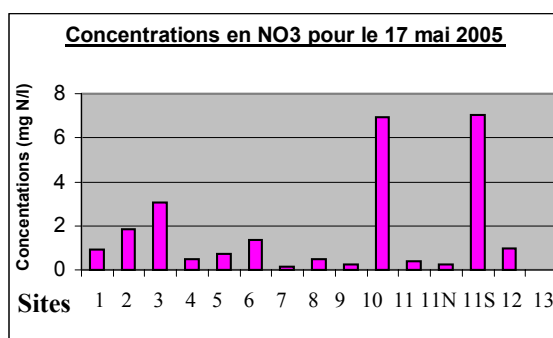
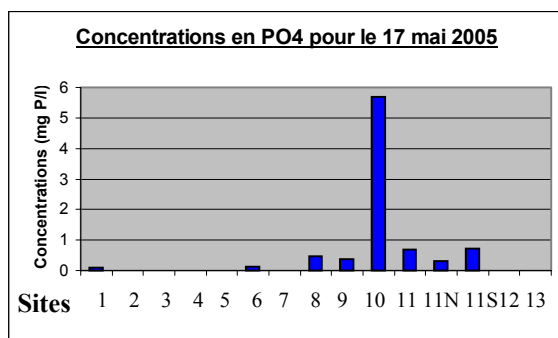
Pour les quatre éléments nutritifs considérés les concentrations sont maximales pour le site 10. Il correspond à la sortie des égouts d'une partie du village de Virelles. Il est donc tout à fait normal que les taux soit si élevés.

Le site 11 Nord traverse trois types de milieu. Il prend sa source dans les prairies, passe ensuite sous une route très fréquentée et termine sa course dans les bois avant de rejoindre l'affluent 11 Sud pour former le 11 qui se jette dans l'étang.

Les eaux de l'étang sont représentées par le point 13. L'utilisation des normes SEQ-eau classe les concentrations en nutriments comme étant bonnes à très bonnes (Système d'Evaluation de la Qualité de l'eau des rivières, voir explication page 47). Cet endroit est le reflet des concentrations de tous les affluents.

L'allure reste semblable au fil des semaines même s'il arrive de voir apparaître des pics de concentrations d'une semaine à l'autre. Ceci est confirmé par l'étude d'une date ultérieure, le 17 mai.

Le 17 mai 2005

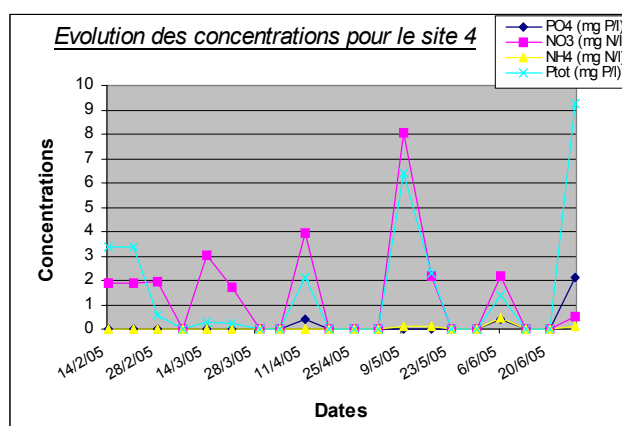
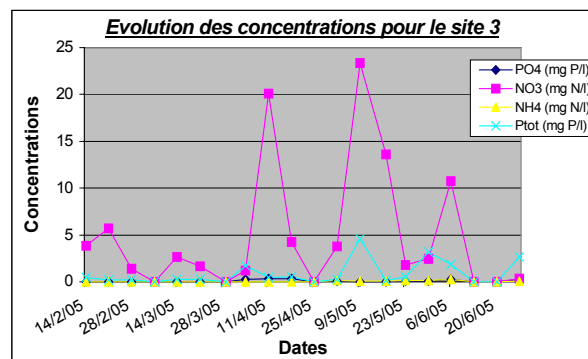
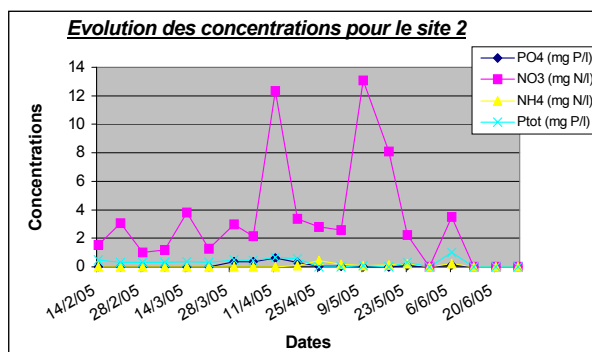


Figures 22, 23, 24 et 25 : Evolution des concentrations en PO₄³⁻, NH₄⁺, NO₃⁻ et P_{tot} pour les affluents de l'étang de Virelles le 14 mars 2005

Les concentrations sont à nouveau maximales pour le point 10 sauf pour le NH₄⁺ qui est maximal pour l'affluent 11S. Ce dernier reçoit aussi des effluents domestiques. Contrairement au 14 mars, les concentrations des quatre nutriments sont beaucoup plus élevées. Cependant, elles gardent le même aspect général.

Les concentrations en PO₄³⁻ sont bonnes à très bonnes excepté pour les sites 10, 11 et 11S.

La norme maximale acceptable pour les nitrates (221,23 mg N/l) n'est atteinte pour aucun site à cette date. Ils sont classés dans la catégorie bonne ou très bonne.



Figures 26, 27 et 28: Graphiques montrant l'évolution des concentrations en PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_3^- et Ptot pour les affluents forestiers de l'étang de Virelles entre le 14 février 2005 et le 27 juin 2005

Quant au phosphore total, seuls trois points (1, 2 et 3) ont une concentration acceptable. Les autres lieux de prélèvement sont, selon le SEQ-eau, hors normes.

3.1.1.1.2. Situations particulières

Les affluents peuvent être distingués selon le type de milieu traversé.

1. Les affluents forestiers

Seuls trois des quinze affluents se situent exclusivement dans les bois (2, 3 et 4).

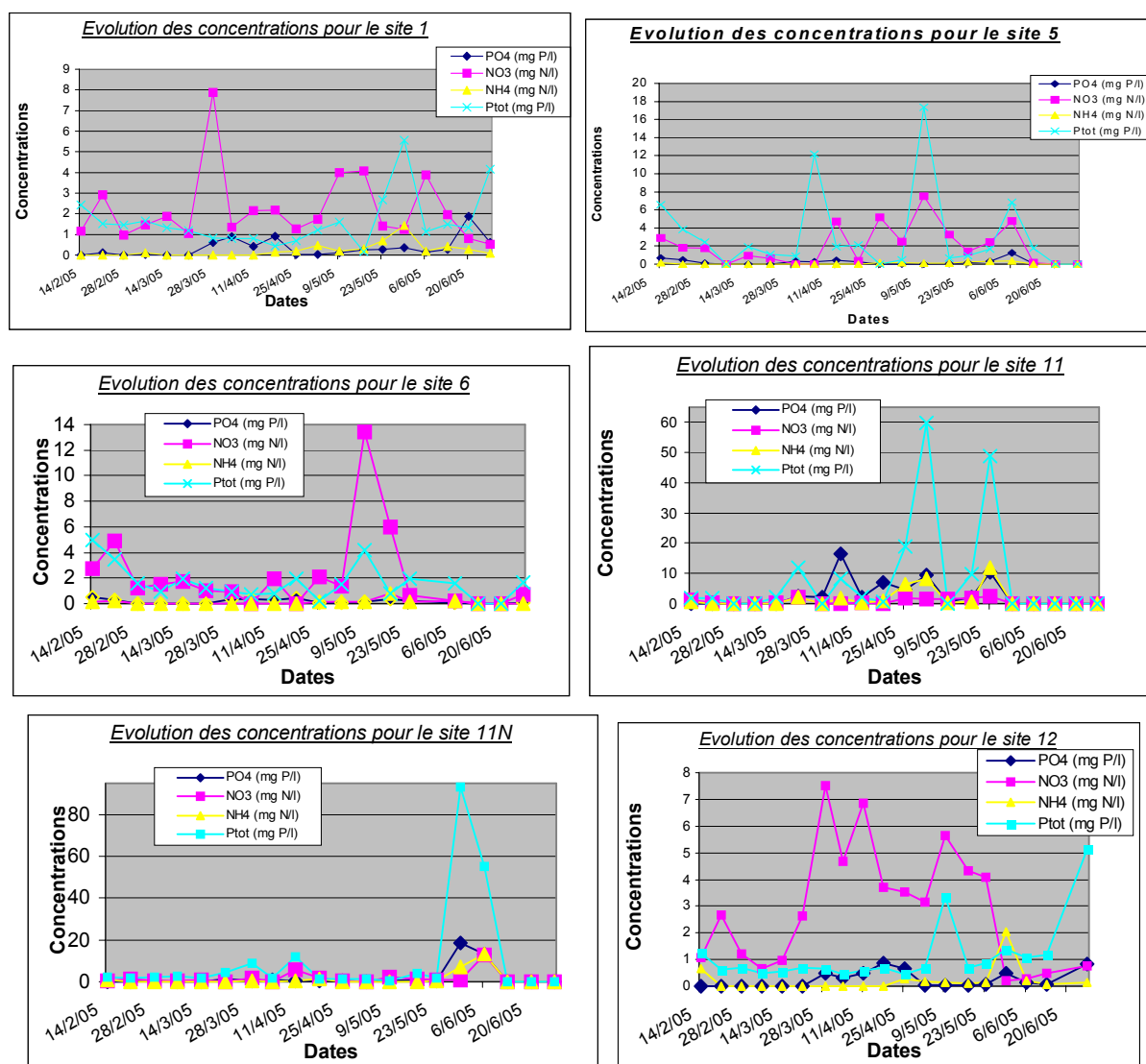
Le *site 2* ne montre jamais, pour la période d'étude, des concentrations dépassant les valeurs considérées comme tolérables. Il s'agit d'une eau purement forestière à trajet fort court pouvant être considérée comme référence.

Le *site 3* présente des concentrations en phosphore total trop importantes voir excessives. Les autres paramètres restent dans des gammes acceptables.

Le *site 4* est un des affluents de l'étang le plus rapidement à sec. Une semaine sans pluie suffit à l'assécher. Le phosphore total est présent en très grandes quantités ($> 3,06 \text{ mg P/l}$). Selon le SEQ-eau, ce site est hors catégorie.

2. Les affluents mixtes (forets-prairies)

Six des quinze affluents traversent des bois et des prairies (1, 5, 6, 11 Nord, 11 et 12).



Figures 29, 30, 31, 32, 33 et 34: Graphiques montrant l'évolution des concentrations en PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_3^- et Ptot pour les affluents mixtes de l'étang de Virelles entre le 14 février 2005 et le 27 juin 2005

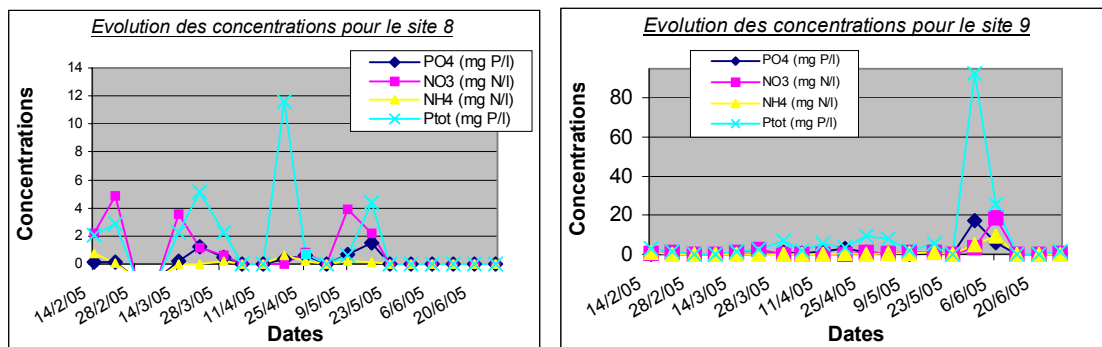
Une fois de plus, le phosphore total est l'élément défavorable pour les sites 1, 5, 6 et 12. Les trois autres critères sont définis comme étant de bonne qualité par le SEQ-eau.

Pour le site 11 Nord, le phosphore total est à nouveau l'élément en excès. En outre, les deux dernières semaines avant d'être à sec (30/05 et 06/06), les concentrations en PO_4^{3-} , NH_4^+ et NO_3^- augmentent brusquement. Ceci est lié à une évaporation massive suite aux conditions météorologiques provoquant une accumulation des nutriments dans l'eau.

Le site 11, comme déjà signalé plus haut est formé par la rencontre des eaux du 11 Nord et du 11 Sud.

3. Le village

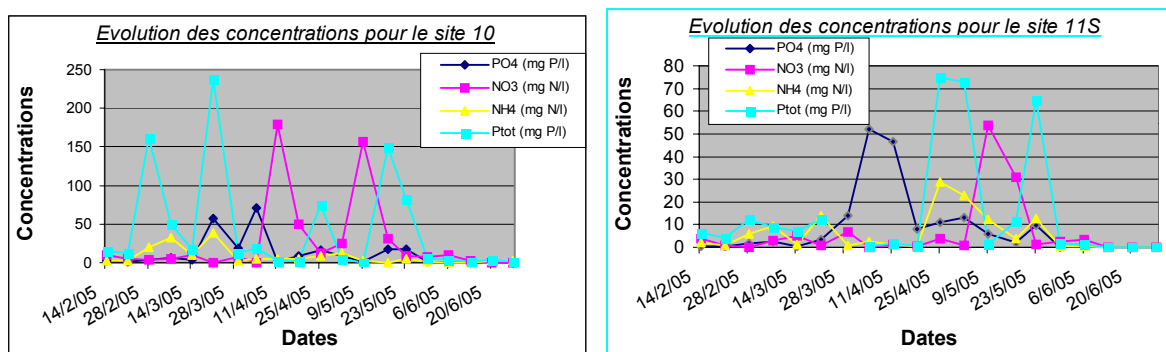
Quatre des quinze affluents traversent le village de Virelles (8, 9, 10 et 11 Sud).



Figures 35 et 36: Graphiques montrant l'évolution des concentrations en PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_3^- et Ptot pour les affluents provenant du village vers l'étang de Virelles entre le 14 février 2005 et le 27 juin 2005

Les affluents 8 et 9 ne subissent pas directement l'influence du village. Le numéro 8 est très souvent à sec. Le peu d'eau qui stagne voit rapidement se développer des grandes quantités d'algues. Pour ces deux sites, le phosphore total est systématiquement hors normes. Les orthophosphates et l'ammonium sont à trois reprises en trop fortes concentrations. Lorsque de les orthophosphates augmentent, on observe le même phénomène pour l'ammonium.

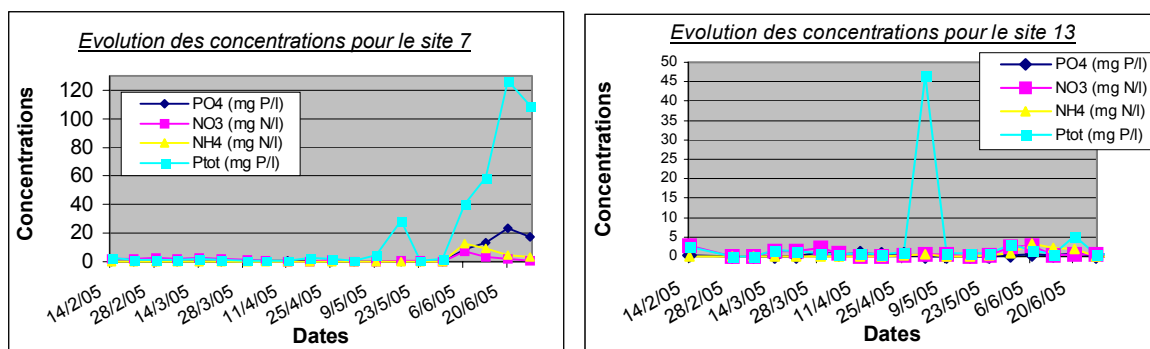
Tous les critères étudiés, mis à part les nitrates, sont en excès pour le 10 et 11 Sud. Ces égouts à ciel ouvert subiront une auto-épuration naturelle avant de se jeter dans l'étang (10) ou avant de former un nouvel affluent (11 Sud).



Figures 37 et 38: Graphiques montrant l'évolution des concentrations en PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_3^- et Ptot pour les affluents provenant du village vers l'étang de Virelles entre le 14 février 2005 et le 27 juin 2005

4. L'étang

Ces deux sites de prélèvement se situent sur les bords le l'étang (7 et 13)



Figures 39 et 40: Graphiques montrant l'évolution des concentrations en PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_3^- et Ptot pour les eaux de l'étang de Virelles entre le 14 février 2005 et le 27 juin 2005

Le *site 7* se situe au niveau du déversoir. Cette eau quitte l'étang pour alimenter l'Eau Blanche. Cet endroit ressemble à une lagune. L'eau qui s'y trouve ne se mélange pas par manque de courant et de vent. L'eau a tendance à stagner et un tapis d'*Hydrodictyon* s'y développe. Les concentrations en nitrates sont correctes. Le phosphore total est à nouveau en excès. En outre, dès que les températures ont été assez élevées et les précipitations faibles, l'ammonium et les SRP ont augmenté jusqu'à dépasser les normes définies par le SEQ-eau ($\text{SRP} > 6,12 \text{ mg P/l}$ et $\text{NH}_4 > 5,14 \text{ mg N/l}$). Par conséquent, les algues filamenteuses ont doucement pris de l'ampleur.

Le centre de l'étang, caractérisé par le point 13, montre des concentrations tolérables pour les quatre critères même si un pic de phosphore total est visible. Cette forte concentration était occasionnelle, de telles valeurs n'ont plus été mesurées depuis.

3.1.1.1.3. Explications concernant les concentrations présentes

Les **nitrates** présentent très rarement des concentrations supérieures à $110,62 \text{ mg N/l}$. Les deux occasions où l'on peut voir un pic de NO_3^- se passe à la sortie des égouts (10) le 11 avril ($179,124 \text{ mg N/l}$) et le 9 mai ($156,495 \text{ mg N/l}$). Ceci permet d'en expliquer aisément la cause. Les nitrates sont principalement issus de l'activité agricole (élevage et engrais) et de l'oxydation naturelle des rejets urbains et industriels.

En outre, les affluents forestiers présentent des concentrations plus élevées que les affluents mixtes. Ceci est confirmé par l'observation des valeurs obtenues pour les affluents 2 et 12. La concentration moyenne pour la période des analyses est de $4,1 \text{ mg N/l}$ pour l'affluent uniquement forestier et de $2,9 \text{ mg N/l}$ pour le mixte. L'explication la plus vraisemblable à cette différence est l'activité bactérienne qui semble plus élevée dans le milieu forestier. En effet, l'absence de prairies en amont exclu une éventuelle action des effluents d'élevage sur cet affluent (2). Il ne faut donc pas sous-estimer l'influence de la litière forestière. Les teneurs ne sont néanmoins pas menaçantes pour le milieu. En effet, le SEQ-eau classe ces deux affluents dans les très bonnes catégories. Pour ce type de nutriment, le problème n'est pas lié à l'agriculture mais bien au manque d'un réseau d'égouttage pour une partie du village.

L'**ammonium** est continuellement présent en excès ($> 5,14 \text{ mg N/l}$) pour certains sites (10 et 11 S) et de façon occasionnelle pour d'autres (7, 9, 11N et 11). La présence de matière azotée résulte en partie des rejets urbains, industriels, agricoles et des organismes vivants eux-mêmes. Les plus fortes concentrations sont, dans ce cas, associées au village.

De plus, le déversoir (site 7), comme je l'ai déjà signalé est un endroit prédestiné à subir

un phénomène d'eutrophisation précoce. Depuis l'apparition des algues filamenteuses, on constate une concentration en ammonium trop élevée (6 juin → 12,567 mg N/l, 13 juin → 9,511 mg N/l, 20 juin → 4,774 mg N/l, 27 juin → 3,195 mg N/l). Une diminution a cependant lieu avec temps et des valeurs normales sont à nouveau visible le 27 juin. Ceci pourrait en partie s'expliquer par l'atténuation des effets du lisier épandu au début du mois et à l'action des algues. A cette période, les agriculteurs réalisent leurs ensilages. Suite à cette pratique, il arrive souvent qu'ils épandent du lisier. Le même mécanisme se serait déroulé au point 11 N, affluent mixte de l'étang. En ce qui concerne le 11, il s'agit tout simplement du mélange des eaux du 11 S et du 11 N ayant des concentrations supérieures aux autres semaines.

Les écosystèmes d'eau douce qui se trouvent à proximité des centres urbains, des zones résidentielles, agricoles ou industrielles risquent de présenter des concentrations de phosphore plus élevées qu'à l'époque où ils n'étaient pas exploités par l'homme. De plus, les milieux humides contenant de grandes quantités de matières organiques présentent habituellement des concentrations en **phosphore total** plus importantes. Le type de substrat influence aussi fortement les apports en phosphore total. Sous l'effet de l'érosion naturelle il est lentement libéré. Il s'introduit dans les écosystèmes d'eau douce par quatre voies:

- les apports atmosphériques (précipitations et poussières),
- les sources ponctuelles (effluents urbains et agricoles),
- les sources diffuses (eaux de ruissellement des terres cultivées et eaux de pluies),

les sources diffuses à l'intérieur du réseau hydrographique (érosion des berges et remise en suspension des sédiments).

Dans ce cas, les quatre voies sont ouvertes. Excepté le Ry Nicolas, tous les autres affluents y compris le centre de l'étang montrent des concentrations supérieures à 3,06 mg P/l. Le maximum est obtenu au niveau du site 10. Ce 21 mars 2005, la concentration en phosphore total a atteint 137,825 mg P/l!

Seules les sources ponctuelles peuvent être contrôlées. Au niveau urbain, un réseau d'égouttage permettrait de réduire les apports directs vers l'étang. Au niveau agricole, une prise de conscience de la part des agriculteurs sur les effets néfastes des épandages excessifs serait utile. Le phosphore est nécessaire mais les quantités sont tellement importantes via la voie naturelle que pour équilibrer le milieu il faudrait pouvoir limiter les apports dus aux activités humaines. Le gouvernement wallon a mis en place l'a.s.b.l. Nitrawal dans le cadre de la gestion durable de l'azote en Wallonie, pourquoi dès lors ne pas mettre en œuvre une structure qui axerait ses objectifs sur le phosphore!

L'apport d'**orthophosphates** dans l'étang n'est pas lié à des sites particuliers. Il est irrégulier, ponctuel, sporadique et dépend souvent d'un apport récent d'engrais ou de lisier sur les prairies. A titre d'exemple, le point 11 Nord, petite rivière éloignée de toute habitation, dont l'eau est habituellement très limpide, s'est retrouvée extrêmement polluée le 30 mai avec une teneur en PO_4^{3-} dépassant la norme maximale de 6,12 mg P/l (18,5 mg P/l). Du lisier venait d'être épandu sur une prairie voisine. L'eau de cette rivière aboutit dans la partie ouest de l'étang et pourrait être aisément confondue avec les eaux domestiques qui aboutissent au même endroit. L'origine est cependant fort différente.

D'autre part, il est évident que les eaux domestiques interviennent pour une grande part de l'enrichissement en phosphates. La teneur y est plus élevée que partout ailleurs encore qu'elle varie au cours d'une journée en fonction des rejets d'eau. Ceci pourrait faire l'objet d'une prochaine étude...

3.1.1.1.4. Résumé de l'état global des affluents

Le SEQ-eau permet d'évaluer la qualité de l'eau et son aptitude à assurer certaines fonctionnalités: maintien des équilibres biologiques, production d'eau potable, loisirs et sports aquatiques, aquaculture, abreuvement des animaux et irrigation. Les évaluations, qui peuvent être conduites sur un prélèvement ou plusieurs prélèvements sont réalisées, à ce jour, au moyen de 156 paramètres de qualité de l'eau regroupés en 15 indicateurs appelés altérations (couleur, nitrates,...). En identifiant les altérations qui compromettent les équilibres biologiques ou les usages, le SEQ-eau autorise un diagnostic précis de la qualité de l'eau et contribue à définir les actions de corrections nécessaires pour son amélioration en fonction des utilisations souhaitées.

Cette aptitude est évaluée, pour chaque altération, à l'aide de 5 classes d'aptitudes allant du bleu (aptitude très bonne) au rouge (inaptitude). (SIMONET, 2001)

Le tableau 8 illustre les classes de qualité pour trois types d'altérations:

- matières organiques et oxydées,
- nitrates,
- matières phosphorées.

Classes de qualité pour 3 altérations					
Classe de qualité	bleu	vert	jaune	orange	rouge
Indice de qualité	80	60	40	20	
Matières organiques et oxydables					
Oxygène dissous (mg/l)	8	6	4	3	
Taux sat. O ₂ (%)	90	70	50	30	
DBO ₅ (mg/lO ₂)	3	6	10	25	
DCO (mg/lO ₂)	20	30	40	80	
KMnO ₄ (mg/lO ₂)	3	5	8	10	
COD (mg/l C)	5	7	10	12	
NH ₄ (mg/l-NH ₄)	0,5	1,5	2,8	4	
NKJ (mg/l-N)	1	2	4	6	
Nitrates					
NO ₃ ⁻ (mg/l NO ₃)	2	10	25	50	
Matières phosphorées					
Phosphore total (mg/l)	0,05	0,2	0,5	1	
PO ₄ ³⁻ (mg/l PO ₄)	0,1	0,5	1	2	

Tableau 8: Classes de qualité pour trois types d'altérations (matières organiques et oxydées, nitrates et matières phosphorées) selon le SEQ-eau

La classe d'aptitude est déterminée au moyen de grilles de seuils établies pour chacun des paramètres de chaque altération et qui tiennent compte (SIMONET, 2001):

- ✓ de la réglementation française et européenne,
- ✓ des recommandations internationales (OMS,...),
- ✓ d'avis d'experts scientifiques et techniques,
- ✓ d'informations validées recueillies dans les banques de données nationales et internationales,
- ✓ des résultats d'une étude bibliographique.

Je me suis contentée de l'étude de quatre critères entrant dans trois types d'altération. Les NH₄⁺ appartiennent au groupe "matières organiques et oxydables", les NO₃⁻ constituent l'altération "nitrates" et les P_{tot} et PO₄³⁻ forment l'altération "matières phosphorées".

Lorsque l'on souhaite caractériser un affluent, il faut examiner toute une série d'altérations et la plus mauvaise note obtenue sera attribuée à ce site. Dans le tableau 9, trois dates ont été

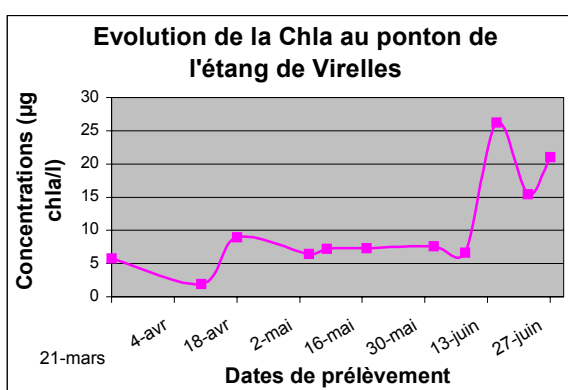
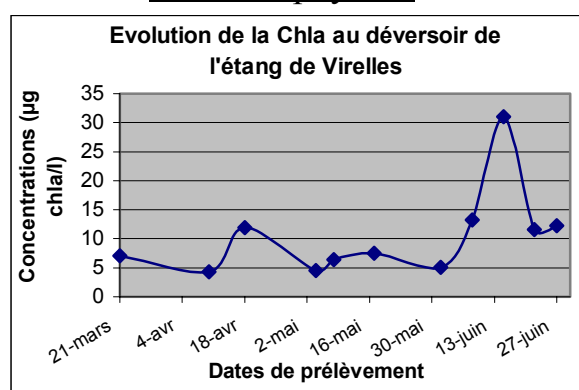
retenues afin de montrer l'évolution susceptible de se produire sur 2 mois. Le 6 juin a été choisi au lieu du 13 juin car à cette date la plupart des affluents étaient à sec.

<u>Site</u>	<u>Aptitudes définies par le SEQ-eau</u>		
	<u>14/02</u>	<u>11/04</u>	<u>06/06</u>
1	Mauvaise qualité	Qualité passable	Qualité passable
2	Bonne qualité	Qualité passable	Qualité passable
3	Bonne qualité	Bonne qualité	Mauvaise qualité
4	Très mauvaise qualité	Mauvaise qualité	Qualité passable
5	Très mauvaise qualité	Mauvaise qualité	Très mauvaise qualité
6	Très mauvaise qualité	Qualité passable	Mauvaise qualité
7	Mauvaise qualité	Qualité passable	Très mauvaise qualité
8	Mauvaise qualité	A sec	A sec
9	Mauvaise qualité	Très mauvaise qualité	Très mauvaise qualité
10	Très mauvaise qualité	Très mauvaise qualité	Très mauvaise qualité
11	Mauvaise qualité	Mauvaise qualité	A sec
11N	Mauvaise qualité	Très mauvaise qualité	Très mauvaise qualité
11S	Très mauvaise qualité	Très mauvaise qualité	Qualité passable
12	Qualité passable	Bonne qualité	Bonne qualité
13	Mauvaise qualité	Qualité passable	Mauvaise qualité

Tableau 9: Tableau montrant l'évolution de la qualité de l'eau des principaux affluents de l'étang de Virelles

3.1.1.2. La chlorophylle a et HPLC

3.1.1.2.1. La chlorophylle a



Figures 41 et 42: Graphiques illustrant l'évolution des concentrations de chlorophylle a du 21 mars au 27 juin 2005 en deux points de l'étang de Virelles

Le profil est semblable pour les deux endroits. Cependant les concentrations sont légèrement plus importantes au déversoir jusqu'au 20 juin. Au-delà de cette date, la situation s'inverse. Ceci peut s'expliquer par la localisation des points de prélèvement. En effet, le déversoir présente les caractéristiques d'une lagune. Le manque de courant et de vent, la forte luminosité et les hautes températures ont provoqué le développement excessif d'algues. Le tapis d'*Hydrodictyon* privait alors le phytoplancton de la lumière et des nutriments nécessaires à leur croissance entraînant un taux de mortalité important et par conséquent une réduction de la chlorophylle a. Ceci ne s'est pas déroulé sur quelques heures ou quelques jours. Depuis le

début du mois de juin, on pouvait deviner les changements se produisant dans les eaux suite à l'apparition des algues filamenteuses sur le site et à l'élévation des concentrations en nutriments...

La VUB a mis au point un tableau permettant de caractériser la qualité d'eau d'un étang sur base de la concentration en chlorophylle *a*.

Etat trophique	Quantité de chlorophylle <i>a</i> (µg/l)
Ultraoligotrophe	< 0,8
Oligotrophe	0,8 – 2,5
Mésotrophe	2,5 – 8
Eutrophe	8 – 25
Hypereutrophe	> 25

Tableau 10: Etat trophique d'un écosystème aquatique selon la quantité de chlorophylle *a* (VUB, 2003)

Le meilleur état présent à l'étang de Virelles est mésotrophe. Dès le début juin, l'étang passe d'un niveau eutrophe à hypereutrophe. Le 13 juin, une forte augmentation du taux de chlorophylle *a* est observé, faisant passer l'étang à un stade hypereutrophe. La semaine suivante, les concentrations diminuent et classent l'étang comme étant eutrophe.

3.1.1.2.2. Comparaison des deux techniques pour définir la quantité de chlorophylle *a* dans un prélèvement

La quantité de chlorophylle *a* déterminée par la technique de Pechar est systématiquement plus importante que pour l'autre technique. Normalement, la différence devrait être minime. L'origine de cet écart serait liée aux conditions de travail dans le laboratoire. En effet, l'intensité lumineuse dans la salle était trop importante pour le remplissage des fioles à HPLC. De plus, ces dernières auraient dû être placées dans de la glace pilée. Ceci aurait provoqué la destruction d'une partie de la chlorophylle *a*. Cependant, les résultats vont être analysés afin de déterminer la constitution phytoplanctonique de l'étang de Virelles au cours du temps.

<u>Date</u>	<u>Lieu de prélèvement</u>	<u>Quantité de chla (µg/l)</u>	
		<i>Technique du spectrophotomètre</i>	<i>Technique de HPLC</i>
26/04/05	Ponton	10,17984	6,94289
04/05/05	Ponton	6,47808	5,18775
08/05/05	Ponton	7,19786	5,45713
17/05/05	Ponton	7,32640	5,90207
01/06/05	Ponton	7,63488	5,60307
08/06/05	Ponton	6,68373	5,98872
15/06/05	Ponton	26,22080	24,52731
22/06/05	Ponton	15,42400	9,78181
27/06/05	Ponton	21,05376	18,75977
26/04/05	Déversoir	9,40864	6,31566
04/05/05	Déversoir	4,47296	3,57945
08/05/05	Déversoir	6,36240	5,20815
17/05/05	Déversoir	7,51920	6,28820
01/06/05	Déversoir	5,08992	3,90580
08/06/05	Déversoir	13,22057	9,90111
15/06/05	Déversoir	31,06834	25,44165
22/06/05	Déversoir	11,56800	15,84362
27/06/05	Déversoir	12,26208	8,79397
27/06/05	Entrée Ry Nicolas	27,76320	23,48348
27/06/05	Lagune Ry Nicolas	11,79936	9,61828
27/06/05	Centre étang	30,84800	27,16563

Tableau 11: Comparaison des quantités de chlorophylle *a* obtenues par deux techniques différentes de quantification

3.1.1.2.3. L'HPLC

3.1.1.2.3.1. Les grands groupes d'algues d'eau douce

Le plancton est l'ensemble des organismes flottants qui se laissent transporter par les courants auxquels ils sont incapables de résister. On distingue le zooplancton (partie animale) du phytoplancton (partie végétale). (DAJOZ, 2000)

Les communautés phytoplanctoniques sont les principaux producteurs d'un écosystème aquatique et sont sous la dépendance de facteurs essentiels tels la lumière, la température et la quantité de matière nutritive présente dans le milieu.

Les algues présentes dans l'étang appartiennent à cinq groupes différents: les Cyanophytes, les Chlorophytes, les Phéophytes, les Euglénophytes et les Pyrrophytes. Les principaux genres d'algues impliqués dans l'eutrophisation se situent dans les trois premiers groupes qui viennent d'être cités.

Les Cyanophytes (algues bleues)

Ces algues sont différentes des autres du fait que ce sont des procaryotes. Leur couleur est fortement variable: bleu, vert, rouge ou violet. Ces variations sont dues à des mélanges de

chlorophylle verte, de phycoérythrine rouge et de phycocyanine bleue.

Elles se développent généralement lorsque les algues vertes n'ont plus assez de nitrates pour survivre. A ce moment, on voit apparaître les cyanobactéries dont certaines sont fixatrices d'azote. Elles vont alors commencer à se reproduire proportionnellement à l'enrichissement du milieu et aux conditions qui leurs sont favorables en début de la saison estivale. Elles formeront éventuellement des fleurs d'eau.

Toutes les cyanobactéries fixatrices d'azote entraînent indirectement, lors de leur mort, une réduction de l'oxygène dissous dans le milieu. Elles seront décomposées par les bactéries aérobies, qui, pour les besoins de leur métabolisme lors de cette dégradation, utilisent l'oxygène dissous dans l'eau. Cependant, il ne faut surtout pas associer l'anoxie d'un milieu à son état eutrophe: si la production primaire a lieu dans des eaux très froides alors le développement bactérien est moins rapide et il ne peut y avoir d'anoxie.

Les Chlorophytes (algues vertes)

Les chlorophytes sont des eucaryotes pouvant se reproduire de façon sexuée (présence d'un noyau). Les principaux pigments marqueurs sont: la chlorophylle *a* et *b*, la B-carotène, la lutéine, la violaxanthine, la zéaxanthine et le néoxanthine.

Ces algues ne sont pas fixatrices d'azote, elles utilisent les nitrates comme source d'apports azotés.

Les Phéophytes (algues brunes)

Les chromophytes constituent un embranchement intéressant grâce à la classe des Bacillariophycées (ou diatomées). Ce type d'algue est caractérisé par la présence de fucoxanthine, diatoxanthine et de diadinoxanthine.

Les diatomées sont les algues phytoplanctoniques unicellulaires les mieux connues. La diversité des parois siliceuses est à la base de la taxonomie.

Ce sont d'abord des populations de chlorophytes qui envahissent le milieu. Les eaux deviennent rapidement témoin d'une prolifération très importante d'algues vertes. La couleur sombre que prennent les eaux devient favorable aux espèces les moins sensibles au déficit de lumière (cyanobactéries). Vers la fin août, c'est la classe des diatomées qui prédomine dans le milieu aquatique. Leur polluo-sensibilité plus ou moins marquée selon les espèces indique le degré de pollution de l'eau grâce à l'utilisation de l'indice diatomique de polluo-sensibilité.

Les Euglénophytes

Cet embranchement est peu présent dans le plan d'eau de Virelles. On distingue deux classes fort différentes: les Cryptophycées et les Dinophycées. Les premières sont définies par la présence de fucoxanthine, de 19'-butanyloxyfucoxanthine et de diadinoxanthine. La violaxanthine est présente chez certaines espèces. Les dinophycées sont, quant à elles, caractérisées par des marqueurs pigmentaires tels la périidine, la dinoxanthine, la diadinoxanthine ainsi que par des dérivés de la périidine.

Les Pyrrophytes

Cet embranchement est assez rare à Virelles. Il ne comprend qu'une seule classe, les Euglénophycées, reconnaissables par la présence de pigments tels que la chlorophylle *a* et *b*, les B-carotènes, la diadinoxanthine, la zéaxanthine et la néoxanthine.

3.1.1.2.3.2. Evolution des communautés entre le 26 avril et le 27 juin 2005

A partir des pigments isolés par l'HPLC, il est possible de déterminer les groupes algaux présents dans le milieu étudié. Ceci permet de mettre en évidence la dynamique de ces populations en fonction des conditions extérieures (météorologie, richesse en nutriments,...).

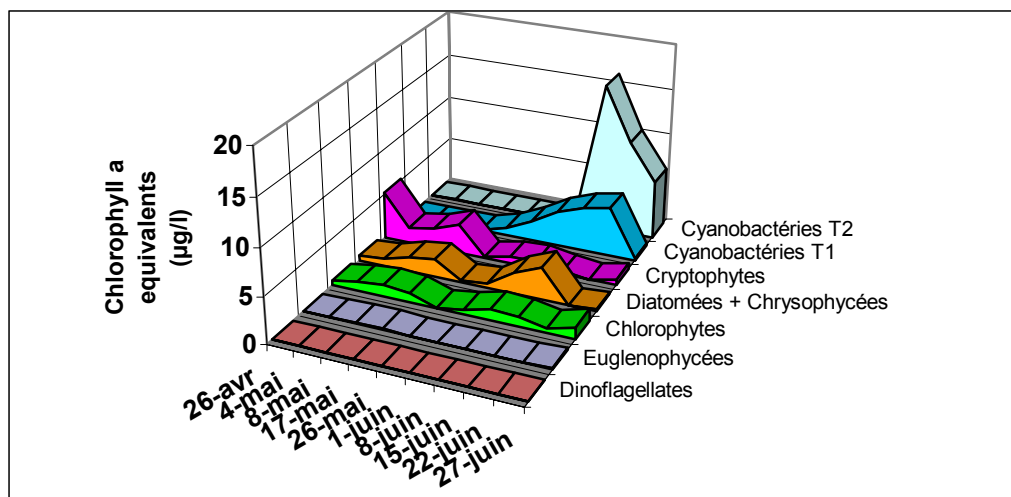


Figure 43: Graphique montrant l'évolution des communautés algales au niveau du déversoir de l'étang de Virelles entre le 26 avril et le 27 juin 2005

Le profil est semblable pour les deux endroits. L'excès de phosphore est le facteur déclenchant la croissance algale. Il stimule d'abord toutes les espèces d'algues confondues, ce qui augmente l'auto-ombrage de l'eau, lequel favorise les espèces les moins exigeantes vis-à-vis de la luminosité: les cyanobactéries.

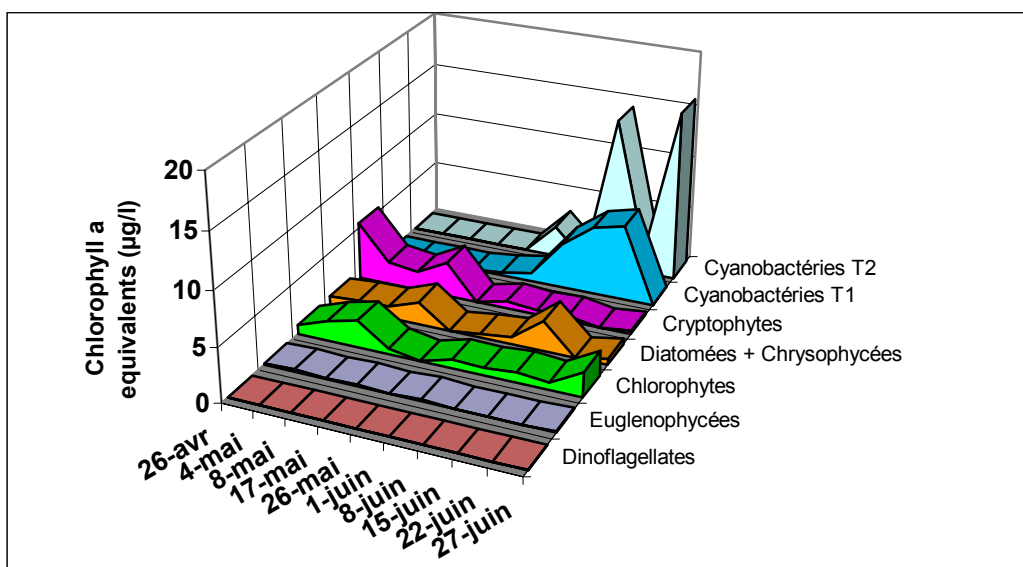


Figure 44: Graphique montrant l'évolution des communautés algales au niveau du ponton de l'étang de Virelles entre le 26 avril et le 27 juin 2005

A la fin avril, les cryptophytes dominent. Trois semaines plus tard, celles-ci diminuent et laissent place aux chlorophytes. Une semaine suffit à retrouver une majorité de cryptophytes mais elles sont cette fois accompagnées du groupe des Chrysophytes. Les diatomées n'ont pu être identifiées avec certitude. Pour cette raison, j'ai préféré ne pas les distinguer de leur embranchement.

Le mois de juin est caractérisé par un accroissement des cyanobactéries. Deux allures sont présentes. La quantité de cyanobactéries T1 augmente graduellement. L'abondance de ces cyanobactéries est plus importante au niveau du ponton. Les cyanobactéries T2, quant à elles, se multiplient beaucoup plus vite. Ceci est illustré par les pics présents sur les graphiques. Ce type de cyanobactérie est rapidement remplacé. Deux semaines suffisent pour éliminer cette population de l'étang ou, inversement, pour les voir réapparaître. L'étude de ces communautés sur une plus longue période et de façon plus approfondie aurait été intéressante afin de confirmer les autres résultats obtenus (nutriments, chlorophylle *a* et macrophytes).

3.1.1.3. Les sédiments

Essentielle dans l'édification de la structure du sol, la matière organique participe aux propriétés de perméabilité et d'aération du sol. De plus, elle facilite les capacités d'hydratation du sol car elle absorbe l'eau aisément (elle est dite hydrophile), sauf si elle est très sèche (elle est alors hydrophobe).

La matière organique joue surtout le rôle de "garde-manger" pour les végétaux et les autres habitants du sol. Outre leur rôle nutritif, les éléments issus de la minéralisation sont également une source d'énergie pour tous les êtres vivants du sol. Ils peuvent augmenter ou inhiber la croissance des végétaux ou encore l'activité biologique du sol. L'humus, type particulier de matière organique, est une sorte de gestionnaire de ce "garde-manger". Ses propriétés chimiques, lui font jouer le rôle d'une éponge qui stocke et libère les éléments (eau, éléments chimiques, etc.) en fonction des besoins et assure ainsi une bonne continuité de l'approvisionnement.

Un sol chargé en matière organique peut être considéré comme un sol riche, tant que d'autres paramètres ne viennent pas modifier la qualité des substances produites par les bactéries lors de la minéralisation. Par exemple, dans le cas d'un pH très acide, la matière organique n'est pas décomposée, et le sol ne peut plus être considéré comme riche puisque les éléments nutritifs ne sont pas disponibles pour les plantes.

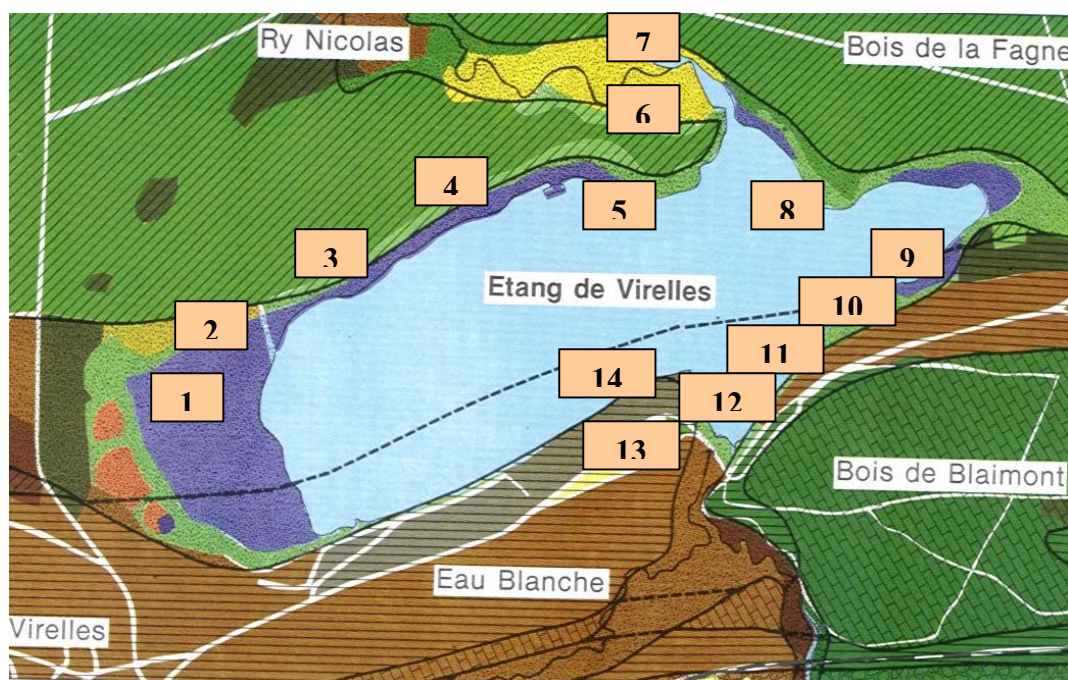


Figure 45: Carte illustrant les lieux d'échantillonnage de sédiment à l'étang de Virelles

Site	Poids MO (g)	Pourcentage de MO (%)
1	2,9315	29,0480
2	1,7739	17,6450
3	0,4731	1,3824
4	4,7808	23,2824
5	0,7270	6,9410
6	1,6178	5,3997
7	1,3660	4,3123
8	2,5936	25,5525
9	0,1901	0,9455
10	0,5500	5,4840
11	1,5836	15,0894
12	1,8132	17,5028
13	1,8973	18,4526
14	0,4511	4,2530

Tableau 12: Résultats de l'analyse de la vase pour les différents sites autour de l'étang de Virelles

Les résultats obtenus par la technique de perte au feu donne des concentrations de l'ordre de 0,94% à 29,04% de matière organique. Bien que la répartition ne soit pas homogène, les teneurs restent acceptables et l'on peut qualifier ces sédiments de fertiles.

3.1.2. Les macrophytes

Les macrophytes présentent une distribution essentiellement littorale. Les peuplements de macrophytes sont façonnés par le degré d'eutrophisation des eaux, les fluctuations de niveau,...

En général, ces végétaux jouent un rôle stabilisant sur l'écosystème lacustre mais en cas d'augmentation des nutriments, leur développement peut engendrer des problèmes (déficit en

oxygène,...). Les macrophytes fournissent des abris, des lieux de reproduction et de repos aux animaux. Ils interviennent dans de nombreuses relations trophiques et fournissent un support pour la croissance des algues épiphytes.

Les plantes aquatiques vasculaires peuvent être séparées en quatre catégories selon leurs habitudes de croissance. Cette classification ne s'occupe pas des relations phylogénétiques, elle se base uniquement sur la façon dont croissent les végétaux sur base des caractéristiques physiques de l'eau. (RIEMER, 1984)

Les quatre catégories sont:

- les plantes flottantes non fixées au sol,
- les plantes flottantes fixées au sol,
- les plantes submergées,
- les plantes émergées.

3.1.2.1. Carte de la répartition des différentes espèces de pleines eaux

En juillet 2004, j'ai réalisé une première campagne afin de me familiariser avec les espèces aquatiques. A cette époque, l'étang était principalement recouvert de *Potamogeton pectinatus*.

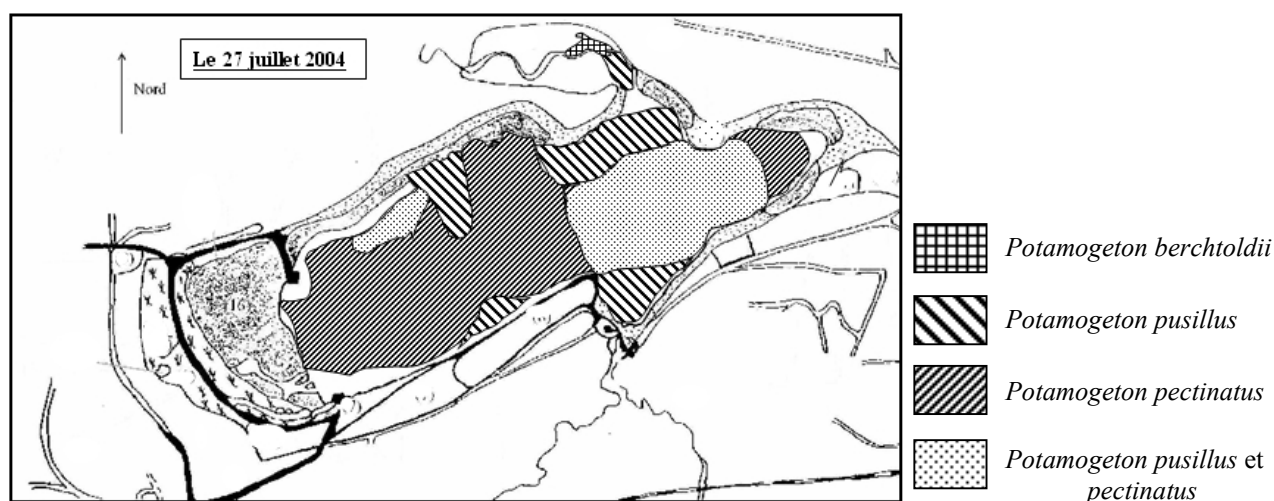


Figure 46: Carte de répartition des espèces de potamots dans l'étang de Virelles le 27 juillet 2004

En revanche, lors de mes observations du 23 mai 2005, l'étang était recouvert de *Potamogeton pusillus*. J'ai vérifié mes échantillons et ce n'est que le 20 juin que j'ai trouvé une explication valable à cette différence: à cette date, l'étang était couvert de *Potamogeton pusillus* accompagné de *Potamogeton pectinatus*.

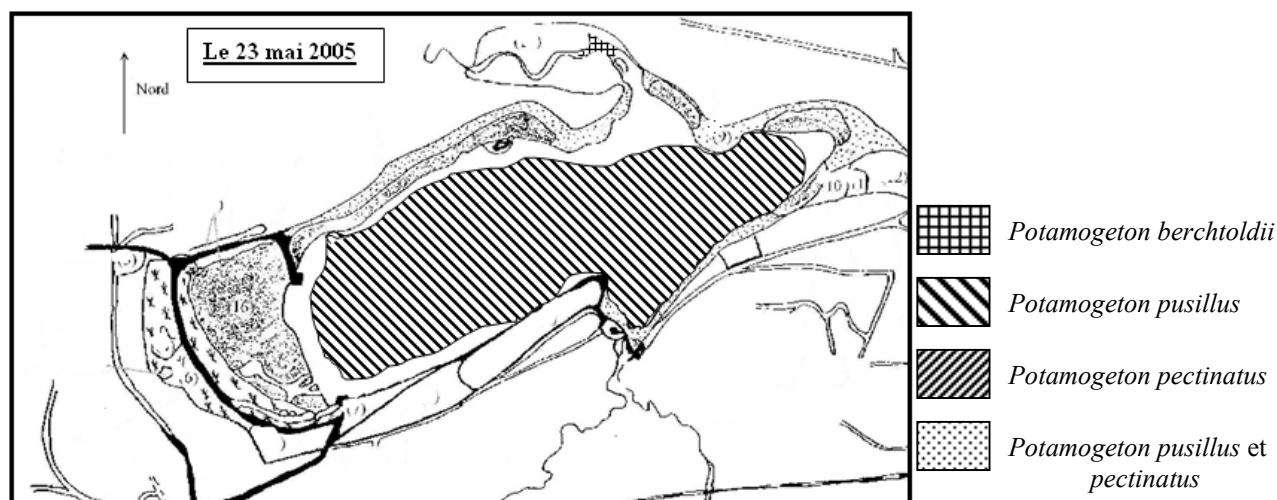


Figure 47: Carte de répartition des espèces de potamots dans l'étang de Virelles le 23 mai 2005

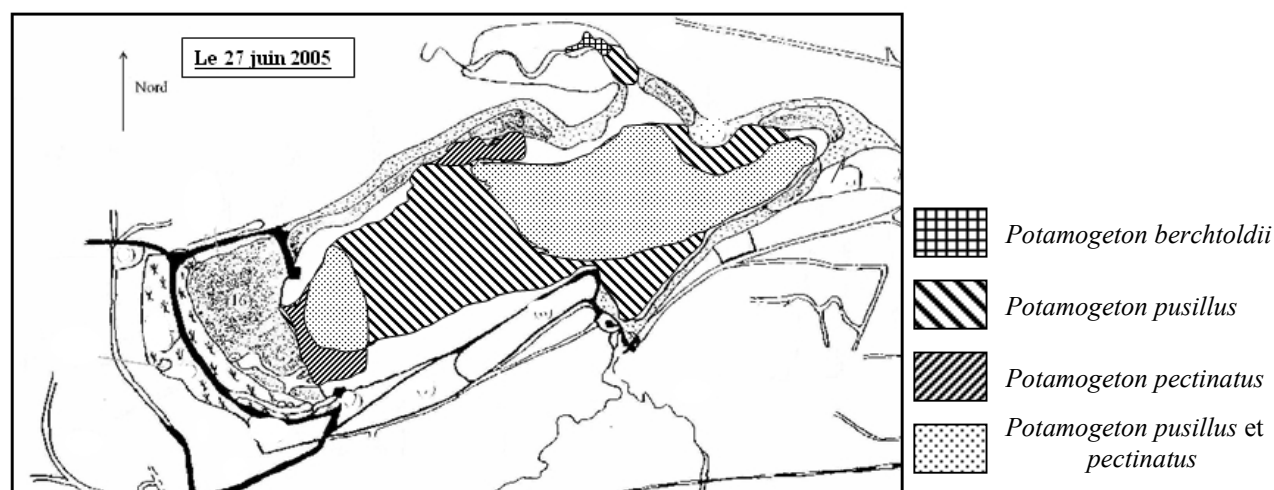


Figure 48: Carte de répartition des espèces de potamots dans l'étang de Virelles le 17 juin 2005

L'hypothèse la plus vraisemblable consiste en une succession dans le temps de ces deux espèces. En effet, une semaine plus tard le *Potamogeton pectinatus* domine sur *Potamogeton pusillus*. Dans la littérature, *Potamogeton pectinatus* est considéré comme espèce des milieux eutrophes contrairement au *Potamogeton pusillus* qui se développe préférentiellement dans des milieux de bonne qualité. L'augmentation des nutriments, le développement des algues, l'accroissement des matières en suspension et du plancton font partie des éléments ayant favorisé cette modification de couverture végétale. Cette succession montre tout l'intérêt de réaliser des études de la végétation à long terme.

3.1.2.2. Liste des espèces présentes dans l'étang de Virelles

Les 6 campagnes de prospection de 2005 ont permis de déterminer 67 espèces de plantes vasculaires et deux types principaux d'algues filamenteuses.

1. Les algues filamenteuses

Au centre de l'étang se trouve principalement *Vaucheria sp.* Les zones plus calmes sont principalement colonisées par *Hydrodictyon reticulatum*. Cette espèce est surtout présente au niveau du déversoir (site 7). C'est à cet endroit que l'on observe des pics de nutriments. Cette

espèce colonise des milieux calmes, bien minéralisés et eutrophes. De plus, elle possède de fortes capacités de multiplication végétative en condition favorable (températures élevées et fort ensoleillement). Cette présence confirme ce qui a été avancé dans la partie concernant les nutriments.

2. Les plantes aquatiques

Hydrophytes fixés par des racines (Rhizophytophytes)

1. Potamogetonides

On trouve les potamots dans une très vaste gamme de milieux. Ces espèces possèdent une grande flexibilité écologique, mais ont souvent une préférence pour une certaine combinaison de paramètres physiques et chimiques.

Les espèces présentes dans la réserve naturelle sont les suivantes:

- *Potamogeton berchtoldii* (Potamot de Berchtold)
- *Potamogeton lucens* (Potamot luisant)
- *Potamogeton natans* (Potamot nageant)
- *Potamogeton pectinatus* (Potamot pectiné)
- *Potamogeton polygonifolius* (Potamot à feuilles de renouée)
- *Potamogeton pusillus* (Potamot fluet)

2. Nymphéides

La nymphe à *Nuphar lutea* (Nénuphar jaune) constitue la phytocénose la plus développée des eaux calmes; elle colonise les étangs, les criques lacustres, les anses calmes. C'est une végétation préférentielle des eaux méso-eutrophes. Ce type d'association est observé au niveau du déversoir, crique où se développent rapidement des algues filamenteuses.

3. Batrachéides

Ce sont des espèces pérennes fixées par des racines. Les feuilles sont souvent dimorphes, soit immergées et laciniées, soit flottantes et spatulées ou arrondies. Le *Callitriche hamulata* (Callitriche à crochets) est la seule espèce de ce groupe présente dans l'étang de Virelles.

Hydrophytes libres, sans attaches avec le fond (Pleustohydrophytes)

1. Lemnides

Les lemnacées ou lentilles d'eau possèdent la caractéristique de former des tapis plus ou moins denses à la surface de l'eau. Le plus souvent, elles vivent en associations avec d'autres plantes tels *Potamogeton pusillus*. Deux espèces ont été identifiées : *Lemna minuta* et *Lemna trisulca*

2. Hydrocharides (chenaux de la roselière et Ry Nicolas)

L'hydrocharaie se situe dans les eaux peu profondes (0,2 à 1 m), à fond vaseux, eutrophe. Ce type de végétation a été découvert dans la crique du Ry Nicolas ainsi que dans les chenaux de la grande roselière. A l'*Hydrocharis morsus-ranae* étaient associés *Galium palustre*,

Juncus effusus, *Carex acuta*, *Carex elongata*, *Carex acutiformis*, *Carex vesicaria*, *Lycopus europaeus*, *Solanum dulcamara*, *Myosotis scorpioides*, *Oenanthe aquatica*, *Rumex palustris*, *Equisetum fluviatile* et *Scutellaria galericulata*.

La plupart de ces espèces se retrouvent en d'autres endroits de l'étang.

Hélophytes

Ces végétaux développent des appareils végétatifs ou reproducteurs totalement aériens et gardent un appareil souterrain dans un substrat vaseux gorgé d'eau. Les hélophytes colonisent le bord des cours d'eau et constituent les ceintures végétales périphériques des étangs et plans d'eau.

- *Alisma plantago-aquatica* (Plantain d'eau commun)
- *Caltha palustris* (Populage des marais)
- *Cardamine amara* (Cardamine amère)
- *Carex acuta* (Laîche aiguë)
- *Carex acutiformis* (Laîche des marais)
- *Carex elongata* (Laîche allongée)
- *Carex paniculata* (Laîche paniculée)
- *Carex pseudocyperus* (Laîche faux-souchet)
- *Carex vesicaria* (Laîche vésiculeuse)
- *Eleocharis palustris* (Scirpe des marais)
- *Epilobium hirsutum* (Epilobe hérissé)
- *Epilobium palustre* (Epilobe des marais)
- *Equisetum fluviatile* (Prêle d'eau)
- *Galium palustris* (Gaillet des marais)
- *Iris pseudocarus* (Iris jaune)
- *Juncus effusus* (Jonc épars)
- *Lycopus europeus* (Lycopé)
- *Lysimachia vulgaris* (Lysimachie commune)
- *Lythrum salicaria* (Salicaire commune)
- *Mentha aquatica* (Menthe aquatique)
- *Myosotis scorpioides* (Myosotis des marais)
- *Oenanthe aquatica* (Oenanthe aquatique)
- *Phalaris arundinacea* (Baldingère)
- *Phragmites australis* (Roseau commun)
- *Polygonum amphibium* (Renouée aquatique)
- *Rorippa amphibia* (Rorippe amphibie)
- *Rumex palustris* (Patience des marais)
- *Rumex sanguineus* (Rumex sang-de-dragon)
- *Sagittaria sagittifolia* (Sagittaire)
- *Scirpus sylvaticus* (Scirpe des bois)
- *Scutellaria galericulata* (Scutellaire toque)
- *Solanum dulcamara* (Morelle douce-amère)
- *Sparganium emersum* (Rubanier rameux)
- *Sparganium erectum* (Rubanier simple)
- *Stachys palustris* (Epiaire des marais)
- *Typha angustifolia* (Massette à feuilles étroites)
- *Veronica anagallis-aquatica* (Mouron aquatique)

Espèces colonisant les berges

Le long des berges, certaines plantes sont retrouvées de façon systématique ou régulière. Ce sont pour la plupart des plantes se plaisant dans des milieux humides mais qui sont enracinées dans la terre non inondée.

Les espèces présentes le long des berges de l'étang de Virelles sont:

- *Achillea millefolium* (Achillée millefeuilles)
- *Agrostis stolonifera* (Agrostis stolonifère)
- *Angelica archangelica* (Angélique vraie)
- *Epilobium angustifolium* (Epilobe en épi)
- *Eupatorium cannabinum* (Eupatoire chanvrine)
- *Festuca filiformis* (Fétuque capillaire)
- *Filipendula ulmaria* (Reine-des-prés)
- *Galeopsis tetrahit* (Galeopsis tétrahit)
- *Geum urbanum* (Benoîte commune)
- *Lolium perenne* (Ray-grass commun)
- *Lychnis flos-cuculis* (Lychnis fleur de coucou)
- *Mercuriale annua* (Mercuriale annuelle)
- *Molinia caerulea* (Molinie)
- *Plantago major* (Plantin à larges feuilles)
- *Ranunculus acris* (Renoncule âcre)
- *Ranunculus serpens* (Renoncule des bois)
- *Scrophularia nodosa* (Scrophulaire noueuse)
- *Senecio jacobea* (Sénéçon jacobée)
- *Tussilago farfara* (Tussilage)

Parmi les espèces trouvées, *Hydrocaris morus-ranae* et *Nuphar lutea* sont respectivement visées par l'annexe VI b et VII du Décret wallon du 6 décembre 2001 relatif à la conservation des sites Natura 2000. L'annexe VI b concerne les espèces végétales menacées en wallonie, elles sont intégralement protégées. Cette observation permet au site de garder ce statut de protection particulier. L'annexe VII touche les espèces végétales partiellement protégées (interdiction de commerce et de destruction intentionnelle).

Seules ces deux espèces furent trouvées durant la période de mon mémoire destinée au terrain. En 2004, d'autres espèces protégées ont été aperçues mais ce fut plus tard dans la saison (*Senecio paludosus*,...). Ceci montre une fois de plus l'intérêt d'étudier les communautés végétales sur de plus longues périodes. De cette façon, toutes les successions temporelles pourront être examinées.

Les concentrations en phosphore total sont en excès pour tous les sites autour de l'étang. Les trois autres paramètres sont, par contre, de très bonne qualité. J'ai essayé de trouver une explication à la présence ou absence de certaines espèces en des endroits particuliers. Ce ne sont pas les concentrations en nutriments qui influencent la répartition de ces espèces étant donné qu'elles sont fort semblables en chaque endroit de l'étang. Il faudrait chercher plus loin et se centraliser par exemple sur les facteurs tels la luminosité, le vent, le type de substrat et la hauteur d'eau.

3.1.2.3. Analyse non symétrique des correspondances

La première campagne d'échantillonnage s'est déroulée le 23 mai 2005. La dernière s'est passée le 27 juin 2005. Entre celles-ci, quatre autres séances eurent lieu.

Analysons d'abord les résultats obtenus pour *le 23 mai*.

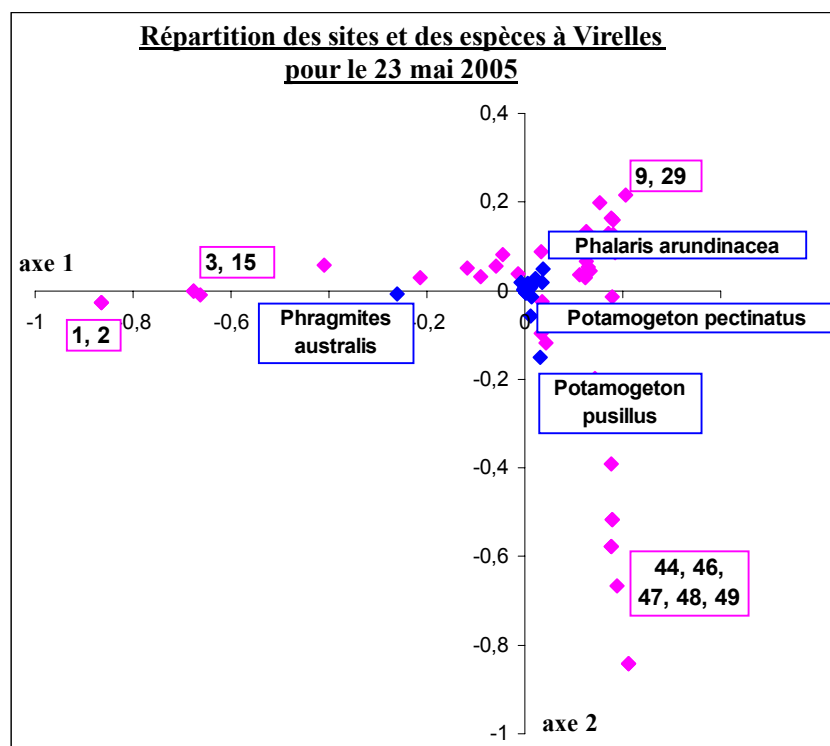


Figure 49: Analyse non symétrique des correspondances du tableau 60 espèces de macrophytes x 52 sites de prélèvements obtenus à l'étang de Virelles le 23 mai 2005. Représentation des relevés dans le plan des deux premiers axes

Les traces des trois premiers axes correspondent respectivement à 27,1; 11,6 et 9,1 % de l'inertie totale soit 47,8 % pour les trois.

On distingue aisément trois groupes de sites ainsi que trois types de végétation. A chaque ensemble de sites, on peut associer un type particulier d'espèces.

Les sites 1, 2, 3 et 15 sont principalement composés de *Phragmites australis*. Sur le terrain ces points de relevés correspondent aux roselières.

Les sites 44, 46, 47 et 48 sont associés aux zones riches en *Potamogeton spp.* Une fois de plus les observations de terrain corroborent ces résultats. En effet, ces sites sont au centre de l'étang, dans les pleines eaux.

Le reste des sites montre une abondance relativement importante en *Phalaris arundinacea*. Cependant, l'abondance varie d'un endroit à l'autre pour être maximale aux sites 9 et 29.

Examinons les trois premiers axes afin de déterminer leur rôle.

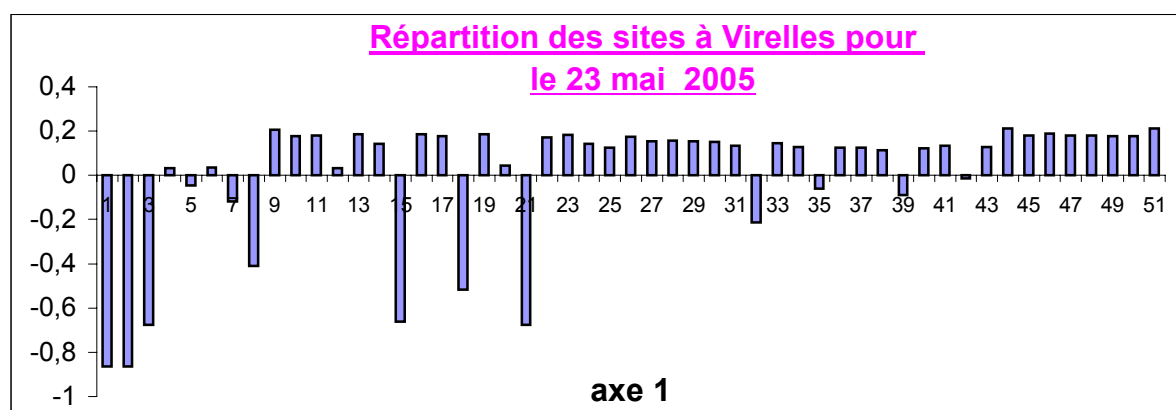


Figure 50: Analyse non symétrique des correspondances du tableau 60 espèces de macrophytes x 52 sites de prélèvements obtenus à l'étang de Virelles le 23 mai 2005. Coordonnées des relevés en fonction de la position géographique sur le premier axe

Sur le premier axe, il est possible d'opposer un groupe de relevés ayant des coordonnées positives (49, 50, 51 et 52) avec les espèces des sites 1, 2, 3, 15 et 18 ayant une valeur négative. Les coordonnées négatives correspondent aux sites pour lesquels *Phragmites australis* est présent en opposition avec les sites de coordonnées positives.

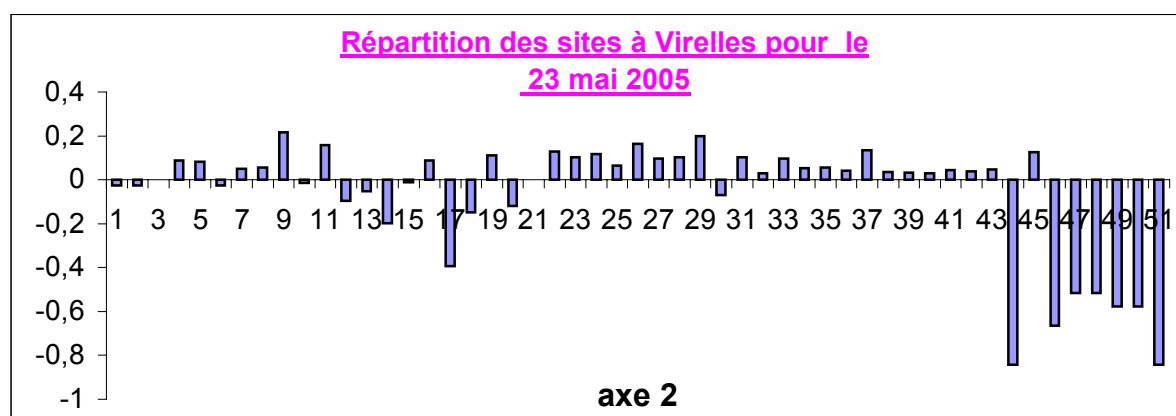


Figure 51: Analyse non symétrique des correspondances du tableau 60 espèces de macrophytes x 52 sites de prélèvements obtenus à l'étang de Virelles le 23 mai 2005. Coordonnées des relevés en fonction de la position géographique sur le deuxième axe

Le second axe sépare les sites 1, 2 et 3 des sites 49, 50, 51 et 52 qui sont des points de relevés situés au centre de l'étang. La localisation joue un rôle essentiel dans le type de végétation présente. En effet, les sites rivulaires peuvent accueillir les quatre catégories de plantes vasculaires alors que ceux de pleines eaux abriteront essentiellement des espèces de *Potamogeton*.

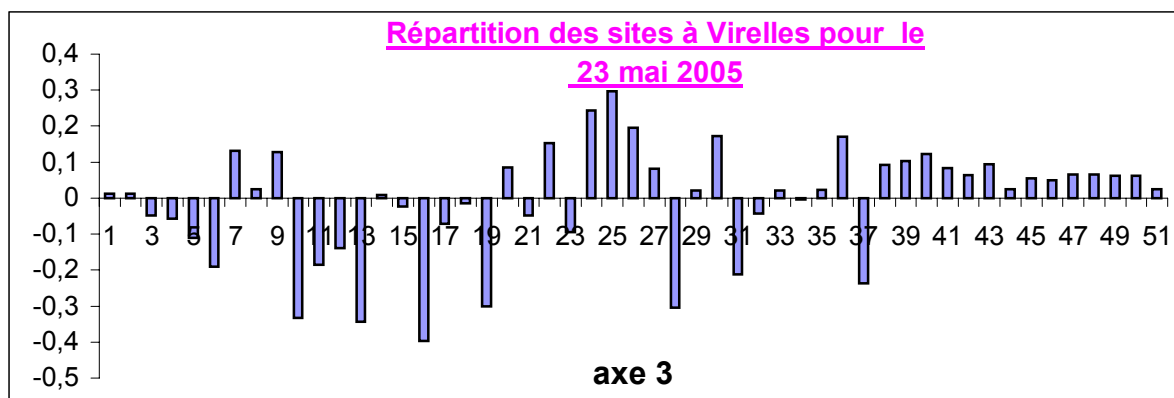


Figure 52: Analyse non symétrique des correspondances du tableau 60 espèces de macrophytes x 52 sites de prélèvements obtenus à l'étang de Virelles le 23 mai 2005. Coordonnées des relevés en fonction de la position géographique sur le troisième axe

Le troisième axe sépare les endroits à végétation homogène (site 1 = roselière) des endroits où la végétation est plus diversifiée (site 25 = Ry Nicolas).

Pour le 23 mai, on peut donc distinguer 3 groupes site-végétation. Durant les six semaines qui suivent, une modification lente est observée jusqu'au **27 juin**, dernier jour de la campagne.

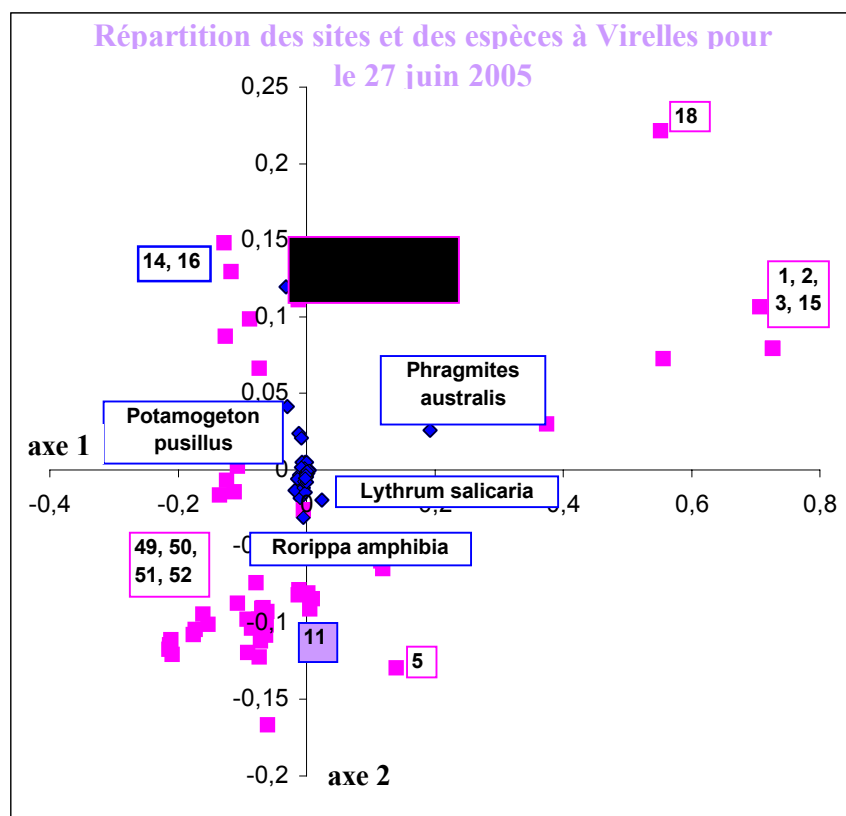


Figure 53: Analyse non symétrique des correspondances du tableau 60 espèces de macrophytes x 52 sites de prélèvements obtenus à l'étang de Virelles le 27 juin 2005. Représentation des relevés dans le plan des deux premiers axes

Les traces des trois premiers axes correspondent respectivement à 27,6; 13,9 et 10,3 % de l'inertie totale soit 51,8 % pour les trois.

Cinq groupes de relevés sont mis en évidence. Les groupes rassemblant les **sites 1, 2, 3, 15 et 18** reprennent les zones où se trouvent les plus grandes agrégations de *Phragmites australis*. Le **site 5** est distinct des autres suite à sa végétation quasiment composée de *Lythrum salicaria*. Près de 50 % de la surface totale du **site 11** comprend de la *Rorippa amphibia*. Les **relevés 49, 50, 51 et 52** se situent en pleines eaux où l'on trouve principalement du *Potamogeton pusillus*. Le *Potamogeton pectinatus* est quant à lui très bien représenté au niveau des **sites 14 et 16**.

La signification des axes ne change pas au cours du temps. Le premier axe permet toujours de distinguer les sites accueillant des *Phragmites australis* de ceux qui n'en ont pas. Le second sépare les sites de faible profondeur (berge) de ceux de profondeur plus importante (pleines eaux). Le troisième classe les endroits en fonction de l'hétérogénéité des espèces présentes (groupements homogènes-groupements hétérogènes)

3.1.2.4. Hiérarchisation par classification divisive

Reprenons le tableau du 27 juin comprenant 60 espèces et 52 sites et réalisons un arbre hiérarchique par classification divisive grâce à la technique des centres virtuels, conduite avec le tableau transformé par l'ANSC. On utilise 6 axes significatifs. La présentation se fait avec 6 centres virtuels. La flèche indique une réallocation.

L'arbre hiérarchisé (fig.54) a été réalisé avec les résultats du 27 juin. Celui réalisé pour le 23 mai permet d'aboutir aux mêmes sous-groupes.

Cette technique forme d'abord un grand et un petit groupe. Les divisions ultérieures produisent la fragmentation du grand groupe en une série de plus petits. Les résultats sont fortement influencés par les espèces fréquentes. En suivant les groupes de gauche à droite dans la figure 54:

1. Par *Lythrum salicaria*
2. Reste des espèces pouvant être à nouveau subdivisé
3. Par *Phalaris arundinacea*
4. Par *Carex vesicaria*, espèce caractéristique du Ry Nicolas
5. Par *Phragmites australis*, espèce caractéristique des roselières
6. Par *Potamogeton spp*

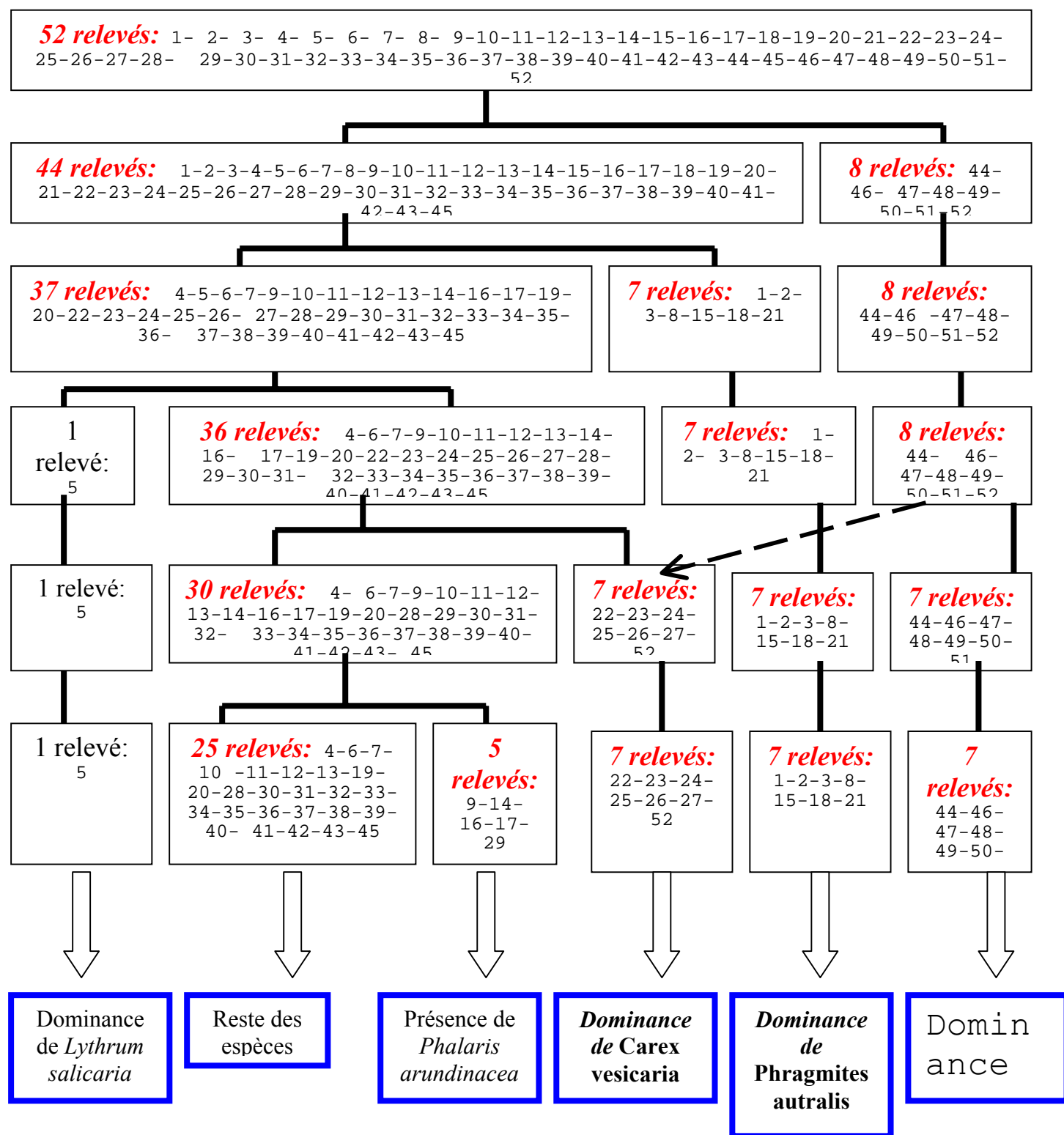


Figure 54: Arbre hiérarchique obtenu par classification divisive du tableau de relevé de Virelles datant du 27 juin 2005 (Technique de Berthet avec réallocation)

3.2. Discussion

L'eutrophisation résulte de l'accumulation de nutriments dans les eaux de surface. Les concentrations en nitrates, ammonium, orthophosphates et phosphore total observées sont importantes. La dernière fois où des valeurs si élevées ont été constatées dans l'étang date de 2003. Entre 2002 et 2005, on observe une modification des teneurs en matières azotées et phosphorées. La vidange automnale de 2003 a réduit les concentrations en nutriments (pour le 4 juin 2003: 3,484 mg NH_4^+ /l; 1,223 mg PO_4^{3-} /l; 9,801 mg NO_3^- /l et pour le 9 juin 2004: 0,141mg NH_4^+ /l; 0,031mg PO_4^{3-} /l; 4,186 mg NO_3^- /l). Lors de la remise sous eau, d'après le SEQ-eau, les valeurs pour les différents nutriments étudiés sont très bonnes. Par contre, elles augmentent en 2005. Le plan d'eau est alors dans un nouvel état critique semblable à celui de 2003 (pour le 25 juin 2003: 2,281 mg NH_4^+ /l; 1,076 mg PO_4^{3-} /l; 1,194 mg NO_3^- /l et pour le 20 juin 2005: 1,937 mg NH_4^+ /l; 0,718 mg PO_4^{3-} /l; 0,525 mg NO_3^- /l). Il s'agit d'une variation cyclique qui est fonction des périodes de vidange.

La principale cause de ces excès est liée aux apports de la partie est du village. Les concentrations en nutriments y sont toujours les plus élevées, quelle que soit l'année ou la saison. Le problème majeur de l'étang consiste en son caractère eutrophe. Les aspects nutriments, chlorophylles, composition algale et végétaux le confirment.

La gestion de l'eau doit être globale. Cela signifie qu'il faut prendre en compte le bassin versant dans son ensemble. Il faut donc tenir compte de ses caractéristiques physiques (comme la pente, le type de couverture du sol, l'exposition, l'imperméabilité du sol, ...) et des phénomènes associés (ruissellement, infiltration,...).

Il est nécessaire d'agir en amont de l'étang. Les apports via les affluents de surface sont surveillés depuis plusieurs années mais ce n'est pas le cas des apports souterrains. Ceux-ci devraient faire l'objet de suivis car la présence de polluants pourrait avoir des conséquences néfastes sur le plan d'eau.

Le principe "pollueur-payeur" est très efficace au point de vue économique. L'argent permet de mettre en place des actions pour protéger le milieu cependant l'idéal serait de prévenir plutôt que de guérir. C'est pour cette raison qu'il est nécessaire de mettre en place des stations d'épurations individuelles ou collectives pour la partie est du village car les eaux usées vont actuellement dans l'étang. Pour 2009, toute habitation devra en être équipée alors pourquoi attendre la date fatidique! C'est seulement à partir de ce moment que l'étang sera en meilleur état.

Le nombre d'équivalents-habitants étant inférieur à 10000, on peut, selon la loi, se contenter d'une épuration primaire. Cependant, pour un bon état de l'écosystème, une épuration tertiaire serait conseillée afin de réduire les nitrates et surtout les phosphates en excès dans l'étang. Les égouts du reste du village sont déjà reliés à une station d'épuration de type primaire. Les eaux sont évacuées dans l'Eau Blanche. Il serait intéressant de voir l'impact sur un milieu qui cette fois est lotique.

Le suivi est une étape importante. Une habitation possède une station d'épuration mais l'analyse de l'eau à la sortie montre des excès en orthophosphates et en phosphore total. Ceci se produit aussi au niveau du lagunage mis en place pour traiter les eaux de la partie touristique de l'Aquascope. Ces apports alimentent directement l'étang. C'est ce problème qu'il faut régler en premier.

La réduction des pollutions domestiques constitue un enjeu essentiel dans la qualité de l'eau de l'étang. La pollution industrielle est quasi inexistante dans le village. Les risques de

pollution accidentelle et de rejets toxiques sont donc réduits. Par contre, la maîtrise des pollutions agricoles est un défi qui tente d'être relevé par Nitrawal. Des actions sont mises en place (aide à la gestion des effluents d'élevage, protection des berges vis-à-vis du bétail, mise en place de haies,...). Cependant, seul l'aspect azote est envisagé. L'idéal serait de mettre en place un groupe dont le but serait de réduire les apports en phosphore.

Gérer l'eau n'est pas qu'une affaire de techniques mais aussi de comportement et donc d'information envers les citoyens. Les gestionnaires ont décidé de laisser l'entrée libre aux zones accessibles au public pour les habitants du village de Virelles. De cette façon, ils peuvent profiter de l'endroit et prendre conscience qu'il faut le protéger à tout prix aussi bien pour eux que pour les générations futures. Cette intention d'informer est bien perceptible dans l'espace découverte de l'Aquascope.

Le phytoplancton et les macrophytes aquatiques ont fait partie de cette approche scientifique. D'autres suivis ont déjà été réalisés mais ce fut de façon succincte ou en amateur. Les observations laissaient parfois place au doute.

La dernière véritable étude concernant le phytoplancton date de 1983. D'autres approches ont eu lieu mais elles se déroulaient sur quelques semaines et n'abordaient pas les différents aspects possibles (comptage et détermination, HPLC et chlorophylle *a*). L'idéal serait de faire une étude complète sur une période de un à deux ans. Les résultats seraient plus représentatifs que ceux que j'ai obtenu pour une période de 10 semaines. Cependant, mes observations ont permis d'illustrer ce qui se passe lors des modifications des teneurs en nutriments dans l'étang. Les algues se développent dans certaines conditions, la présence des cyanobactéries est l'une des nombreuses manifestations du caractère eutrophe de l'étang.

Au niveau des macrophytes, les potamots étaient suivis de façon relativement régulière pendant l'été et sur de courtes périodes. Les plantes rivulaires n'ont, par contre, jamais fait l'objet de relevés systématiques. Mon approche (10 mois) a permis de mettre en évidence une succession dans le temps de *Potamogeton pusillus* suivi de *Potamogeton pectinatus*. La cause de cet enchaînement n'est autre qu'une altération de la qualité de l'eau. Les macrophytes sont donc de bons bioindicateurs de l'état trophique de l'étang.

En outre, les années précédentes, *Zannichellia palustris* était observée. En 2004 et 2005, cette espèce n'a pas été retrouvée. A-t-elle disparu ou bien y a-t-il eu une erreur de détermination à la base? Les endroits où elle était identifiée correspondent aux sites où j'ai inventorié *Callitriche hamulata*! Une vérification des herbiers réalisés ces années là s'impose (s'il existent toujours). De plus, certaines espèces telle *Littorella uniflora* (Littorelle) semble avoir disparu tandis que d'autres se propagent (*Hydrocharis morsus-ranae*). Pour être vraiment complète, j'aurai dû poursuivre mes observations jusqu'à la fin de la saison floristique. Mes résultats de 2004 permettent néanmoins d'enrichir mes informations.

Je me suis concentrée sur le plan d'eau mais il aurait été aussi intéressant d'examiner les espèces végétales de la partie terrestre de la Réserve. On y trouve *Orchis ssp*, *Scilla bifolia*,... ainsi que d'autres espèces faisant l'objet d'une protection particulière.

L'approche statistique a permis de définir divers types de milieu en fonction des particularités floristiques. Un jour peut-être, ces endroits seront désignés par leurs caractéristiques végétales établies pendant ce mémoire.

Le schéma de la figure 55 illustre ma réflexion: la diminution de la biodiversité est fonction des apports en phosphore (élément en excès dans les eaux de l'étang) et donc de

l'augmentation subséquente de la production primaire.

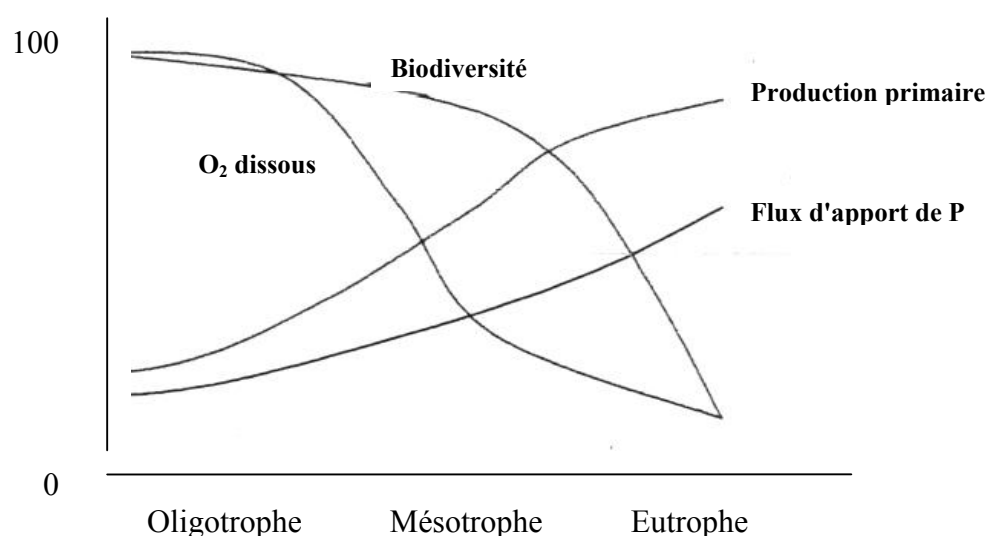


Figure 55: Conceptualisation de l'eutrophisation selon Corell (1998)

Il montre clairement les dangers menaçant le site en cas d'aggravation de la situation. Actuellement la production primaire s'accroît fortement et les concentrations en phosphore augmentent. Il s'ensuit une réduction d'oxygène dissous provoquant de façon directe et indirecte une réduction de la biodiversité dans la réserve.

En 2004, plusieurs brèmes gisaient sur l'étang. En 2005, il s'agissait de brochets. Le milieu s'appauvrit en oxygène. La mortalité observée en est une preuve. Une solution existe. L'utilisation d'hydrolienne permet l'oxygénation des eaux grâce à l'action des vents. Ce système a déjà fait ses preuves à l'étranger. Malheureusement une seule est mise en place sur l'étang, il en faudrait d'autres exemplaires. Outre le déficit en oxygène, la concentration d'azote ammoniacal doit être surveillée. Vu la faible densité de poissons, l'ammoniaque excrété n'est rien par rapport à la décomposition anaérobie de la matière organique morte. Il est donc utile de surveiller l'étang sur ces points critiques. La présence de faune piscicole a pourtant aussi un avantage: les poissons filtreurs réduisent la quantité de plancton et les herbivores limitent la superficie des herbiers qui envahissent l'étang. L'utilisation appropriée de certaines espèces telle la carpe herbivore pourrait être une proposition de gestion afin d'améliorer les conditions de l'étang.

La faune ornithologique est très diversifiée dans la réserve. Les différents milieux incitent une grande diversité d'oiseaux à venir s'y reproduire ou à y reprendre des forces. Si la chaîne trophique est anéantie, le site sera déserté...

Un autre problème est apparu cette année. Les rats musqués se propagent dans l'étang. Ils creusent leur terrier dans les berges. Chaque terrier comporte plusieurs galeries qui ont leurs orifices sous eau et remontent ensuite vers la berge pour aboutir dans une ou plusieurs chambres. Ce travail de fouille provoque des affaissements et des effondrements de terre. Ils s'attaquent également à la végétation. Ces rongeurs se nourrissent de diverses plantes aquatiques dont ils ne mangent que les parties tendres, les bulbes et les jeunes pousses, ce qui provoque leur disparition rapide. De plus, ils leur arrivent de couper les roseaux pour se construire des huttes.

L'excès de nutriments n'est donc pas le seul responsable de la disparition des macrophytes mais l'eutrophisation reste la principale source de perte de la biodiversité du site de la Réserve de l'étang de Virelles.

4. Conclusion et perspectives

L'eutrophisation de l'étang de Virelles est un phénomène complexe dont les origines sont une pollution domestique et agricole. Les aspects nutriments, chlorophylle, composition algale et végétaux le confirment.

Le facteur à maîtriser est le phosphore. Une réduction de celui-ci doit être envisagée si l'on souhaite éviter un accident semblable à celui de 2001. Dix tonnes de poissons ont péri en deux jours sans que l'on puisse faire quoi que ce soit! Cet épisode dramatique est lié à la somme de facteurs négatifs entraînant une mortalité énorme. En effet, un amas d'algues de couleurs et d'épaisseurs variées s'est développé dans la couche superficielle de l'étang. Les fortes pluies d'été ont alors provoqué un mélange des eaux et causé l'anoxie du milieu.

Les fleurs d'eau ont aussi des effets indirects. Par exemple, les algues empêchent la lumière de parvenir aux plantes aquatiques immergées. Leur décomposition par des bactéries aérobies entraîne une réduction de l'oxygène disponible dans le milieu. Suite à la densité de ces algues, l'expansion des plantes aquatiques tels les roseaux est freinée.

Comme signalé dans l'introduction, en l'absence de producteurs primaires, pas de poissons et sans eux, pas d'oiseaux. Le manque d'actions pour contrecarrer cette tendance risque d'entraîner la perte de la réserve!

Il faudrait donc résoudre le problème de l'eutrophisation avant d'envisager divers aménagements pour rendre l'écosystème plus accueillant envers les plantes et les organismes.

De nombreuses solutions peuvent être envisagées:

1. Il faudrait réduire les apports d'eau polluée en provenance d'une partie du village de Virelles. Pour cela, des stations d'épurations individuelles ou collectives doivent être installées. Une épuration tertiaire est fortement conseillée.
2. Il faudrait continuer la campagne lancée par Nitrawal afin d'informer les agriculteurs des conséquences des mauvaises pratiques agricoles.
3. L'implantation de haies et talus parallèlement aux courbes de niveaux serait utile dans le bassin versant. Ces aménagements favorisent la réduction de la vitesse d'écoulement des eaux pluviales, la décantation des limons chargés de pesticides et la filtration par le sol. De plus, ils induisent un labourage perpendiculaire à la pente qui limite l'érosion hydraulique des sols.
4. L'utilisation appropriée de poissons, par exemple de *Ctenopharyngodon idella* (carpe herbivore), permettrait de réduire les herbiers ainsi que la propagation des algues. Cette espèce ne représente pas une menace directe pour l'écosystème: la température de l'eau étant trop faible, la reproduction n'aura pas lieu.
5. L'ouverture du déversoir (si la quantité d'eau est assez importante) permettra de créer un

courant suffisant pour qu'une partie des algues soit entraînée par ce flux. Elles se retrouveraient dans les eaux de l'Eau Blanche où elles mourraient puisque les eaux y sont plus fraîches et tumultueuses, conditions inappropriées pour des algues se développant dans les plans d'eau calmes. Cependant, il serait préalablement nécessaire d'étudier les concentrations en nutriment de cette rivière. Une partie non négligeable de phosphore sera nouveau disponible à leur mort. Mais attention, un excès pourrait être nocif pour cet écosystème!

6. Dès l'apparition des algues sur le site, des campagnes devraient être réalisées afin de les retirer à l'aide de crochets, par exemple. L'enlèvement manuel d'une partie des cyanobactéries a comme avantage de décharger le milieu d'une quantité de phosphore non négligeable et de réduire la propagation entraînant les conséquences préalablement évoquées.

En outre, des études complémentaires impliquant les diatomées, les macro-invertébrés et les poissons, par exemple, permettraient d'affiner les propositions de gestion.

L'indice de Polluo-Sensibilité des diatomées est une piste intéressante au point de vue technico-économique. Elles ont comme avantage d'être présentes dans tous les milieux aquatiques et de montrer divers degrés de sensibilité à la pollution. De plus, ces indicateurs de pollution à court terme sont peu sensibles aux modifications physiques du milieu aquatique. Elles permettent donc de fournir une estimation globale de l'impact de la qualité physico-chimique de l'eau sur les communautés aquatiques.

L'indice des macro-invertébrés (IB et IBGN) serait un élément complémentaire aux analyses d'eau. Chaque affluent pourrait être caractérisé par cette démarche. L'intérêt de ces organismes est la présence d'un large spectre de réponse aux stress environnementaux ainsi que leurs diverses sensibilités à la pollution.

L'indice poisson (IBIP) pourrait être un élément utile. En effet, lors des vidanges de l'étang les communautés piscicoles montrent des incohérences dans les classes d'âges présentes. Cette approche permettrait de caractériser les populations en absence de condition de stress prolongé (vidange). Elle apportera éventuellement une explication à ce phénomène (prédation supplémentaire lors de la baisse du niveau d'eau, conditions défavorables à la fécondation et au développement des œufs,...).

L'étude plus détaillée des communautés phytoplanctoniques et zooplanctoniques aurait été pertinente. Celle-ci aurait, par exemple, permis d'apporter des informations complémentaires sur le type de cyanobactérie présent lors des pics du 15 et 27 juin 2005. Il serait intéressant de déterminer d'établir par la suite un modèle concernant la mise en place des fleurs d'eau.

En outre, la réalisation de suivis sur plusieurs années concernant les nutriments serait un plus afin de mettre en évidence l'évolution des diverses concentrations et l'impact des actions mises en place (Charte de l'étang). Sur 24 heures, les apports vers l'étang varient. Une étude plus approfondie fournirait des renseignements utilisables dans la gestion du site.

Les apports agricoles sont largement influencés par les conditions météorologiques. Il faudrait mettre en parallèles les activités agricoles et les conditions climatiques des jours suivants. Un épandage suivi de fortes précipitations aura un impact plus important sur le plan d'eau qu'en condition de sécheresse.

L'eutrophisation est donc un phénomène très complexe. Son évolution doit être suivie de façon régulière. Pour assurer la survie de l'écosystème, des modifications favorables devront être envisagées. La principale action visera à améliorer la qualité de l'eau permettant à l'étang de redevenir un milieu mésotrophe. Des modifications au sein des différents maillons de la chaîne trophique s'en suivront...

Références bibliographiques

- ◆ <http://mrw.wallonie.be/dgrne/sibw/sites/natura2000/carto/BE32036.htm>
- ◆ http://mrw.wallonie.be/dgrne/fiches_enviro/v3/content/top.cfm
- ◆ <http://mrw.wallonie.be/cgi/dgrne/sibw/sibw.sgid.form.pl?SGIBCODE=179>
- ◆ http://www.lepur.geo.ulg.ac.be/Etudes/Etude_info96.html
- ◆ <http://www.vub.ac.be/APNA/research/scipub.html>
- ◆ <http://www.nitrawal.be>
- ◆ <http://www.aquawal.be>
- ◆ <http://www.wes.army.mil/el/aqua/apis/ecology/html/samplin1.html>
- ◆ <http://users.skynet.be/Bouxin.Guy/ASDV/ASDV.htm>

A.s.b.l. Virelles-nature, Caractéristiques du bassin versant et de l'étang de Virelles, *Rapport établi pour l'a.s.b.l. Nitrawal* (2002).

Barroin G., La pollution des eaux par les phosphates, *La Recherche* **221**, 620-627 (1990).

Bouxin G., Les techniques d'ordination, <http://users.skynet.be/Bouxin.Guy/ASDV/ASDV.htm> (2005).

Bouxin G., Traitement statistique d'un ensemble de tableaux floristiques, <http://users.skynet.be/Bouxin.Guy/ASDV/ASDV.htm> (2005).

Bouxin G., La classification numérique des relevés de végétation, <http://users.skynet.be/Bouxin.Guy/ASDV/ASDV.htm> (2005).

Carbiener R., Trémolières M. & Muller S., Végétation des eaux courantes et qualité des eaux: une thèse, des débats, des perspectives, *Acta Botanica Gallica* **142**, 489-531 (1995).

Carlier M., Duvigneaud J., Jacob J.P. & Mathot R., La flore de l'étang de Virelles et de ses abords, *Entente nationale pour la protection de la nature a.s.b.l.* (Septembre 1984).

Carte des sols de Belgique, Chimay

Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, Méthode d'analyse: détermination de la matière organique par incinération: méthode de perte au feu, (27 mars 2003).

Convention pour une Charte de l'étang, document interne de l'a.s.b.l. Virelles-Nature (2002).

- Corell D.L., The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: a review, *Journal of Environmental Quality* **27**, 260-265, (1998).
- Cook C., Aquatic plant Book, *SPB Academic Publishing*, Amsterdam/New York (1996).
- Dajoz R., Précis d'écologie, *Dunod*, Paris (2000).
- Dartevelle Z. & Vlayen P., Antibiose bactérienne dans les sédiments, *Institut Royal Belge des Sciences Naturelles* (1981).
- Delvaux C., Clé de détermination des principaux macrophytes des eaux douces de Belgique, *Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix Namur* (1999).
- Demierre A. & Durand P., La végétation macrophytique du Léman, *Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut.*, Campagne 1998, 129-217 (1999).
- Dethioux M., Les caricaies du bord des eaux, *Communications du Centre d'Ecologie Forestière et Rurale (IRSIA)* (1982).
- Dethioux M., Les cours d'eau de Wallonie: caractéristiques physiques et floristiques, principes et techniques de verduration, *Publication réalisée dans le cadre des recherches du Centre de Recherche et de Promotion forestières* (1991).
- Duvigneaud J., Le lac de Virelles (province de Hainaut, Belgique), sa valeur botanique, *Natura Mosana* (1983).
- Dartevelle Z. & Verhaegen J.P., L'étang de Virelles, bactériologie des sédiments observations générales, *Institut Royal Belge des Sciences Naturelles* (1981).
- Fitter R., Fitter A. & Blamey M., Guide des fleurs sauvages, éd. *Delachaux et Niestlé* (1997).
- François C. & Pierret S., Etat des lieux du réseau d'égouttage sur le bassin versant de l'étang de Virelles à partir d'une enquête auprès des riverains, *a.s.b.l. Virelles-Nature* (Août 2003).
- Froment A. & Tanghe M., Répercussion des formes anciennes d'agriculture sur les sols et la composition floristique, *Recherches sur l'écosystème forêt série B: La chênaie mélangée calcicole de Virelles-Blaimont* (1967).
- Haury J., Peltre M.-C., Muller S., Trémolières M., Barbe J., Dutartre A. & Guerlesquin M., Des indices macrophytiques pour estimer la qualité des cours d'eau français: premières propositions, *Ecologie* **27**, 233-244 (1996).
- Jeffrey S.W., Mantoura R.F.C. & Wright S.W., Phytoplankton pigments in oceanography, *UNESCO*, 45-75 (1997).
- Lambinon J., De Langhe J.E., Delvosalle L. & Duvigneaud J., Nouvelle flore de Belgique, du Grand-Duché du Luxembourg, du Nord de la France et des régions voisines, éd. *Du Patrimoine du jardin botanique national de Belgique* (2004).

Laudelout H., Devillez F., Lambert R. & Legrand C., Etude biogéochimique d'une rivière de wallonnie: le Rieu d'Ostenne à Chimay, *Laboratoire de la Fagne de Chimay* (1984).

Lee G.F., Role of phosphorus in eutrophication and diffuse source control, *Wat. Research* **7**, 111-128 (1973).

Les macrophytes aquatiques bioindicateurs des systèmes lotiques. Intérêts et limites des indices macrophytiques, *travail réalisé dans le cadre du G.I.S. "Macrophytes des eaux continentales"* (Octobre 2001)

Mackey M. D., Mackey D. J., Higgins H. W. & Wright S. W. CHEMTAX- a program for estimating class abundances from chemical markers: application to HPLC measurements of phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series* **144**, 265-283 (1996).

Moureau Z., Wartel S. & Leclere V. Etude de la qualité des eaux, en particulier des affluents, *Etude réalisée par l'Institut Royal Belge des Sciences Naturelles dans le cadre d'une convention avec le comité de gestion et d'exploitation de l'étang de Virelles* (Septembre 1985).

Moureau Z., Le lac de Virelles: paramètres chimiques et biologiques, *Rapport sur les activités 1982-1983* (1983).

Moureau Z., Goddeeris B., Wattiez C., Wartel S. & Metens V., L'étang de Virelles et son bassin versant: qualité des eaux, *document de travail n°50 de l'Institut Royal Belge des Sciences Naturelles* (1988).

Noirfalise A. & Dethioux M., Synopsis des végétations aquatiques d'eau douce en Belgique, *Communications du Centre d'Ecologie Forestière et Rurale (IRSIA)* (1977).

Ometak V., Autoépuration de l'Eau Blanche: rivière du sud de la Belgique. Rapport de stage, *Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique* (1986)

Pechar L., Use of an acetone: methanol mixture for the extraction and spectrophotometric determination of chlorophyll-*a* in phytoplankton, *Arch. Hydrobiol. Suppl.* **78**, 99-117 (1987).

Philippart B., L'étang de Virelles: un site à découvrir..., 2^{ème} édition éd. *Conseil de gestion du site naturel de Virelles* (1990).

Présentation de la charte de l'étang de Virelles, *Nitrawal*

Riemer D. N., Introduction to freshwater vegetation, *AVI Publishing Company INC.*, Connecticut (1984).

Simonet F., Le nouveau système d'évaluation de la qualité de l'eau des rivières: le SEQ-eau, *Revue de l'agence de l'eau Adour-Garonne* **81**, 7-9 (Hiver 2001).

Sire M., L'étang: sa flore, sa faune, *Société Nouvelle des éditions N. Boubée* (1976).

Symoens J.J., De Clercq M., Osafo R.A. & Sansen U., The lake of Virelles (Prov. Hainaut, Belgium): Management of a lake for nature conservation and recreation, *éd. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung* (1988).

Symoens J.-J., Kusel-Feltzmann E. & Descy J.-P. Algal communities of continental waters, *Vegetation of inland waters*, 183-221 (1988).

Vanden Berghen C., Initiation à l'étude de la végétation, *Jardin botanique national de Belgique* (1982).

Virelles: un étang en voie de régénération, *Tiré du Bulletin de la Société d'Etude Ornithologique Aves* **29** (1992).